

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

**POVEZANOST ABRAZIVNOSTI S OSTALIM FIZIKALNO – MEHANIČKIM
SVOJSTVIMA STIJENA**

Diplomski rad

Andrija Gudelj Velaga

R 193

Zagreb, 2018.

POVEZANOST ABRAZIVNOSTI S OSTALIM FIZIKALNO - MEHANIČKIM SVOJSTVIMA STIJENA

ANDRIJA GUDELJ VELAGA

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

U diplomskom radu su prikazani rezultati ispitivanja povezanosti abrazivnosti i drugih fizikalno mehaničkih svojstava stijena. Na temelju ranije objavljenih studija kojima je cilj istraživanja bio utvrditi CERCHAR indeks abrazivnosti (CAI) analizirana je zavisnost. U analizi, stijene su svrstane u kategorije prema nastanku i prikazani su rezultati modela sa značajno izraženom povezanošću abrazivnosti i ostalih fizikalno mehaničkih svojstava. Također je napravljena procjena jednoosne tlačne čvrstoće i indirektna vlačna čvrstoća dijabaza iz kamenoloma Kraljev Vrh, s obronaka Medvednice, Jelenje vode pokraj Lasinje i Brensborg Točak pokraj Orahovice, vapnenca iz kamenoloma Špica pokraj Novog Marofa i mramora iz kamenoloma Vukov Dol pokraj Kašine pomoću dobivenih modela.

Ključne riječi: jednoosna tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, CERCHAR indeks abrazivnosti

Diplomski rad sadrži: 76 stranica, 19 tablica, 20 slika, 53 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF-a
Dr. sc. Zlatko Briševac, docent RGNF-a
Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF-a

Datum obrane: 07. rujna 2018.

CONNECTION OF ABRASIVENESS WITH OTHER PHYSICO- MECHANICAL PROPERTIS OF
ROCKS

ANDRIJA GUDELJ VELAGA

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

Master's thesis presents the results of analysing the correlation between abrasion and other physical-mechanical properties of rocks. The dependence was analyzed based on the previously published studies aiming to establish the CERCHAR abrasion index (CAI). In the analysis, the rocks are classified into categories by origin; and the model's results with significantly expressed connection between abrasion and other physical-mechanical properties are shown. The evaluation of the uniaxial compressive strength and indirect tensile strength of the diabase from the quarries Kraljev Vrh - on the slopes of Medvednica, Jelenje vode near Lasinja and Brensborg-Točak next to Orahovica was made. Limestone from the quarry Špica near Novi Marof and marble from the quarry of Vukov Dol near Kašina were also used in this evaluation.

Keywords: uniaxial compressive strength, tensile strength, CERCHAR abrasivity index

Thesis contains: 76 pages, 19 tables, 20 figures and 53 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Trpimir Kujundžić, Full Professor

Reviewers: PhD Trpimir Kujundžić, Full Professor
PhD Zlatko Briševac, Assistant Professor
PhD Tomislav Korman, Assistant Professor

Date of defense: September 07, 2018

Sadržaj

Popis slika.....	III
Popis tablica.....	IV
Popis korištenih oznaka i SI jedinica.....	V
1. UVOD	1
2. FIZIKALNO-MEHANIČKA SVOJSTVA STIJENE	2
2.1. Čvrstoća.....	2
2.1.1. Jednoosna tlačna čvrstoća stijene	2
2.1.2. Vlačna čvrstoća stijena	4
2.1.3. Indeks čvrstoće određen postupkom opterećivanja u točki	5
2.2. Abrazivnost	6
2.2.1. Ispitivanje abrazivnosti	7
2.2.2. Uređaj za ispitivanje Cerharovog indeksa abrazivnosti	12
2.2.3. Postupak ispitivanja.....	14
2.2.4. Mjerenje zatupljenja igle	15
2.2.5. Izračun i klasifikacija CAI	17
2.2.6. Nedosljednost ispitivanja	18
2.3. Poroznost.....	19
2.4. Youngov modul elastičnosti.....	19
2.5. Izotropija i anizotropija	22
2.6. Brzina prolaza valova.....	22
2.7. Ekvivalentni sadržaj kvarca	23
2.8. Gustoća.....	24
2.9. Tvrdća.....	24
2.10. Tvrdća po Shore-u.....	25
3. PROVEDENA ISPITIVANJA.....	26
4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA.....	46
4.1. Analiza rezultata ispitivanja sedimentnih stijena	47
4.2. Analiza metamorfnih stijena	48

4.3.	Magmatske stijene.....	49
5.	PROCJENA UCS-a I BTS-a DOBIVENIM MODELIMA	51
6.	ZAKLJUČAK	53
7.	LITERATURA.....	54
	DODACI.....	57

Popis slika

Slika 2.1 Princip ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće (Hrženjak, 2013)	3
Slika 2.2 Četiri karakteristična modela sloma smični, vlačni, smično vlačni i plastični (Hrženjak, 2013).....	3
Slika 2.3 Princip ispitivanja indirektne vlačne čvrstoće (Hrženjak, 2013)	5
Slika 2.4 Princip ispitivanja PLT testom (Hrženjak, 2013)	5
Slika 2.5 LCPC uređaj (Labaš i sr., 2012)	10
Slika 2.6 NTNU uređaj (Labaš i sr., 2012.)	11
Slika 2.7 Osnovni mehanizmi i skice dvaju glavnih oblika ispitnih uređaja. Lijevo - originalni CERCHAR dizajn, desno - Westov dizajn (Alber i sr., 2013)	13
Slika 2.8 Mjerenje zatupljenja igle (Alber i sr, 2013.).....	15
Slika 2.9 Asimetričnost vrha igle (Alber i sr, 2013.)	16
Slika 2.10 Profil zatupljene površine (Alber i sr, 2013.)	16
Slika 2.11 Tangentni Youngov modul E_{tan} (Małkowski i Ostrowski, 2017)	20
Slika 2.12 Prosječni Youngov modul E_{av} (Małkowski i Ostrowski, 2017)	20
Slika 2.13 Sekantni modul elastičnosti E_{sec} (Małkowski i Ostrowski, 2017)	21
Slika 4.1 Zavisnost UCS-a o CAI	46
Slika 4.2 Zavisnost BTS-a o CAI	47
Slika 4.3 Zavisnost UCS-a o CAI sedimentnih stijena	47
Slika 4.5 Zavisnost UCS/CAI metamorfnih stijena.....	48
Slika 4.6 Zavisnost BTS/CAI metamorfnih stijena	49
Slika 4.7 Zavisnost UCS/CAI magmatskih stijena	50
Slika 4.8 Zavisnost BTS/CAI magmatskih stijena	50

Popis tablica

Tablica 2-1. Primjer CERCHAR testa abrazivnosti s pet ponavljanja i četiri mjerenja istrošene površine bočnim prikazom (Alber i sr., 2013)	17
Tablica 2-2. Klasifikacija stijena prema abrazivnosti (Alber i sr., 2013).....	18
Tablica 2-3. Mohsova skala tvrdoće	25
Tablica 3-1. Vrijednosti ispitivanja provedena od Kahramana i suradnika	26
Tablica 3-2. Rezultati ispitivanja provedena od Rostamia i suradnika	27
Tablica 3-3 Ostala fizičko-mehanička svojstva ispitana od Rostamia i suradnika.....	27
Tablica 3-4 Tipične vrijednosti	28
Tablica 3-5 Ispitivanja troosne tlačne čvrstoće	28
Tablica 3-6 Rezultati ispitivanja provedenih od He i suradnika	29
Tablica 3-7 Rezultati ispitivanja Moradizadeha i suradnika	30
Tablica 3-7 Rezultati ispitivanja Moradizadeha i suradnika – nastavak	31
Tablica 3-8 Rezultati ispitivanja magmatskih stijena Koa i suradnika	32
Tablica 3-8 Rezultati ispitivanja magmatskih stijena Koa i suradnika - nastavak	33
Tablica 3-8 Rezultati ispitivanja magmatskih stijena Koa i suradnika - nastavak	34
Tablica 3-9 Rezultati ispitivanja metamorfnih stijena Ko i suradnika	34
Tablica 3-9 Rezultati ispitivanja metamorfnih stijena Ko i suradnika – nastavak	35
Tablica 3-9 Rezultati ispitivanja metamorfnih stijena Ko i suradnika – nastavak	36
Tablica 3-9 Rezultati ispitivanja metamorfnih stijena Ko i suradnika – nastavak	37
Tablica 3-10 Rezultati ispitivanja Era i Tugrula	37
Tablica 3-10 Rezultati ispitivanja Era i Tugrula	38
Tablica 3-11 Rezultati ispitivanja Abu Bakara i suradnika.....	38
Tablica 3-11 Rezultati ispitivanja Abu Bakara i suradnika – nastavak.....	39
Tablica 3-11 Rezultati ispitivanja Abu Bakara i suradnika – nastavak.....	40
Tablica 3-12 Ostala fizičko–mehanička svojstva ispitana od Abu Bakara i suradnika.....	40
Tablica 3-12 Ostala fizičko–mehanička svojstva ispitana od Abu Bakara i suradnika.....	41
Tablica 3-13 Rezultati ispitivanja Capika i Yilmaza.....	42
Tablica 3-13 Rezultati ispitivanja Capika i Yilmaza – nastavak.....	43
Tablica 3-14 Rezultati ispitivanja Ündüla i Era	44
Tablica 3-14 Rezultati ispitivanja Ündüla i Era – nastavak	45
Tablica 5-1 Rezultati ispitivanja Grgurića	51
Tablica 5-2 Izračun prema modelu analize.....	52

Popis korištenih oznaka i SI jedinica

UCS	Jednoosna tlačna čvrstoća	Pa
BTS	Indirektna vlačna čvrstoća	Pa
CAI	CERCHAR indeks abrazivnosti	
c	kohezija	N
φ	Kut unutarnjeg trenja	°
σ	Čvrstoća	Pa
N	Sila	N
F	Sila	N
A	Površina poprečnog presjeka	m ²
D	Promjer uzorka	mm
t	Debljina uzorka	mm
τ	Posmično naprezanje	Pa
PLT	Indeks čvrstoće u točki	
Is	Indeks čvrstoće	Pa
De	Dijametar uzorka	mm
DRI	Indeks brzine bušenja	
AV	Indeks abrazivnosti	
AVS	Indeks abrazivnosti čelika	
Gi	Indeks abrazivnosti rezanjem	
d	Duljina ili promjer zatupljenosti trošenjem	mm
HRC	Tvrdoća prema Rockwellu	
n	Poroznost	
V	Volumen	m ³
E	Youngov modul	MPa
EQC	Ekvivalentni sadržaj kvarca	%
A	Indeks abrazivnosti	
Ri	Rosiwalov indeks abrazivnosti	
ρ	Gustoća	kg/m ³
m	Masa	kg
SH	Tvrdoća prema Shore-u	

1. UVOD

Abrazija je trošenje ili kidanje čestica s površine alata. Zato mehanička i tehnološka svojstva stijena izravno utječu na ekonomičnost mehaničkog rezanja, radne procese, korištene alate i strojeve (Labaš i sr., 2012). Jednoosna tlačna čvrstoća (UCS) i indirektna vlačna čvrstoća (BTS) predstavljaju neke od najvažnijih mehaničkih svojstava stijena, a tvrdoća, bušivost i abrazivnost stijene predstavljaju najvažnija tehnološka svojstva.

Za određivanje UCS potrebno je prikupiti prizmatične ili valjkaste uzorke određenih proporcija. To je zahtjevan postupak koji otežava i poskupljuje istraživanje. Isto tako ponekad nije moguće doći do odgovarajućih uzoraka za određivanje UCS-a. Cilj ovog rada je odrediti model kojim bi se vrijednost UCS-a i BTS-a stijene dobila preko vrijednosti CERCHAR indeksa abrazivnosti (CAI). Razlog za istraživanjem zavisnosti između CAI i UCS i BTS-a je što je utvrđivanje CAI znatno brži, lakši i jeftiniji postupak. Dobivanjem značajne zavisnosti među ovim svojstvima omogućilo bi korištenje samo CAI-a, uz uzimanje u obzir i drugih fizikalno-mehaničkih svojstava stijena, za procjenu čvrstoće stijena na temelju koje se mogu donositi odluke u eksploataciji. CAI ispitivanje se sastoji od povlačenja čelične igle, koja simulira radni alat, preko površine uzorka stijene. Za to ispitivanje su potrebni znatno manji uzorci, a ispitivanja se relativno brza.

Pretpostavka da su jednoosna tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća u visokoj korelaciji s CERCHAR indeksom abrazivnosti značilo bi da se CAI može koristiti za brzo i dovoljno pouzdano određivanje, bez potrebe za prikupljanjem i izradom propisanih uzoraka.

U radu su se uspoređivali podaci analiza abrazivnosti i ostalih fizikalno-mehaničkih svojstava sedimentnih, metamorfnih i magmatskih stijena iz različitih literaturnih izvora. Analizom se utvrđivala korelacija CAI-a, UCS-a i BTS-a. Statističkim metodama obrađeni su podaci provedenih studija. Tako su u radu opisana najvažnija mehaničko-tehnološka svojstva stijena, metode i postupci ispitivanja abrazivnosti te je napravljen pregled dosadašnjih ispitivanja i analiza.

2. FIZIKALNO-MEHANIČKA SVOJSTVA STIJENE

2.1. Čvrstoća

Čvrstoća je maksimalno naprezanje koje materijal može podnijeti bez loma za bilo koji tip opterećenja. Čvrstoća je jedna od osnovnih informacija pri opisu stijena.

Čvrstoća kamena ovisi o mineralno-petrografskim čimbenicima kao mineralnom sastavu, čvrstoći minerala koji grade stijenu, jačini kohezije između zrna, krupnoći materijala i njihovom međusobnom odnosu, teksturnoj anizotropiji, zatim poroznosti, sposobnosti upijanja vode, raspucalosti i svježini stijene (Tomašić i sr., 2000, Maričić 2014).

Razlikujemo više vrsta čvrstoće:

- Tlačna (jednoosna ili troosna)
- Vlačna
- Posmična.

2.1.1. Jednoosna tlačna čvrstoća stijene

Jednoosna tlačna čvrstoća (UCS) stijena je mehaničko svojstvo definirano kao najveće naprezanje u jednom smjeru uz slobodno bočno širenje kod kojeg dolazi do loma materijala. Naprezanje je izraženo u MPa i definirano kao sila (N) koja djeluje po jedinici površine (m²). U momentu loma dolazi do pucanja, pomicanja, savijanja i deformacije mineralnih zrna i pornog prostora uzorka.

Jednoosna tlačna čvrstoća se može prikazati s izrazom:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \text{ [MPa]} \quad (2-1)$$

gdje je:

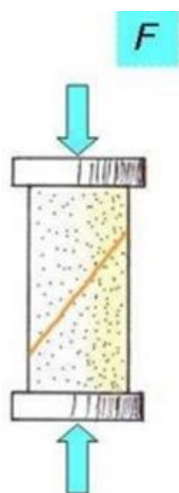
σ_c –tlačna čvrstoća [MPa]

F –sila pri kojoj dolazi do loma [MN]

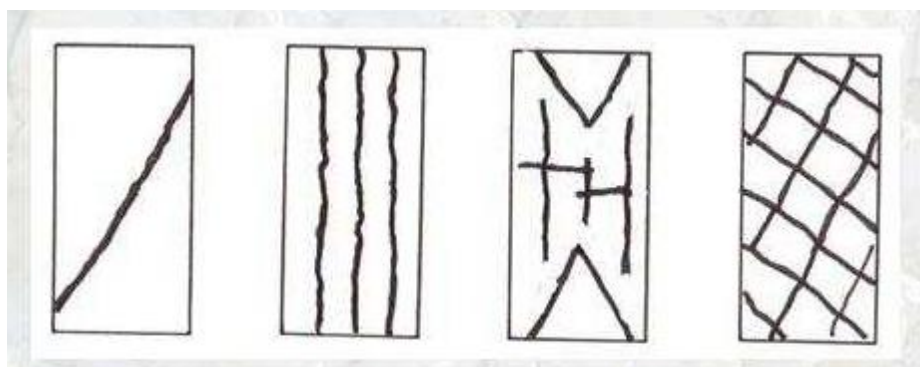
A –površina poprečnog presjeka [m²]

Ispitivanja se provode prema preporukama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM) na valjkastim uzorcima pravilnih dimenzija s odnosom visine i promjera 2,5–3,0:1,0 te s dijametrom za koju nije poželjno da bude ispod 54 mm. Dijametar uzorka bi trebao biti bar 10 puta veći od prosječne veličine zrna. Broj uzoraka koji se ispituje bi trebao biti minimalno 5. Baze uzorka moraju biti bez neravnina većih od 0,02 mm, i okomite na plašt koji ne smije imati neravnine veće od 0,25 mm. Opterećenje na uzorak se treba nanositi kontinuirano, na takav način da do sloma dođe unutar 5 do 10 minuta od početka naprezanja. Kontinuirani prirast opterećenja je od 0,5 do 1 MPa.

Princip ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće je prikazan na slici 2.1, dok su karakteristični tipovi slomova prikazani na slici 2.2. Slomovi mogu biti smični, vlačni, smično vlačni i plastični.



Slika 2.1 Princip ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće (Hrženjak, 2013)



Slika 2.2 Četiri karakteristična modela sloma smični, vlačni, smično vlačni i plastični (Hrženjak, 2013)

2.1.2. Vlačna čvrstoća stijena

Vlačna čvrstoća stijenskoga materijala obično se definira kao najveće vlačno naprezanje koje taj materijal može izdržati. Stijenski materijal obično ima nisku vlačnu čvrstoću, a njezino određivanje može se provesti direktnim i indirektnim postupcima od kojih je najpoznatiji Brazilski test (Briševac i sr., 2015).

Brazilski test je indirektni postupak određivanja vlačne čvrstoće stijene. Stijena se izlaže tlačnom opterećenju na način da se izazove vlačno naprezanje uzorka stijene. Rezultat brazilskog testa je vlačna čvrstoća stijene (σ_{BTS}) prikazana formulom:

$$\sigma_{BTS} = \frac{2F}{\pi * D * t} \quad (2-2)$$

gdje je:

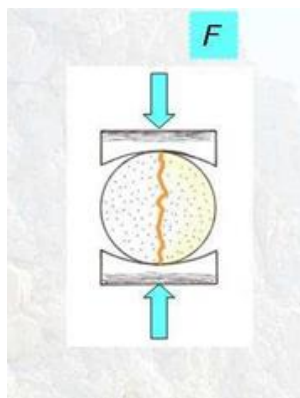
σ_{BTS} – indirektna vlačna čvrstoća stijene [MPa]

F – sila sloma uzorka [kN]

D – promjer uzorka [mm²]

t – debljina uzorka [mm]

Prema ISRM-u ispitivanja se obavljaju na cilindričnom uzorku koji ima promjer ne manji od 54 mm i debljinu koja je približno jednaka polumjeru uzorka. Neravnost plašta cilindra ne smije biti veća od 0,025 mm. Bar 10 ispitnih uzoraka se preporučuje uzeti za jednu vrstu stijene, odnosno iz jednog uzorka formira se 10 ispitnih uzoraka. Opterećenje na uzorku treba biti kontinuirano s konstantnim prirastom, tako da lom nastupi unutar nekoliko minuta. Prirast opterećenja ovisi o čvrstoći i veličini uzorka, i varira između 10 i 50 kN/min. Princip ispitivanja je prikazan na slici 2.3.



Slika 2.3 Princip ispitivanja indirektna vlačne čvrstoće (Hrženjak, 2013)

2.1.3. Indeks čvrstoće određen postupkom opterećivanja u točki

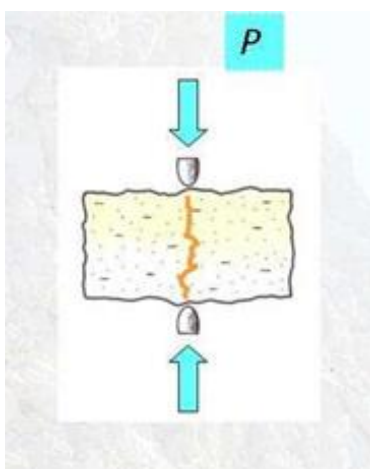
Indeks čvrstoće određen postupkom opterećivanja u točki (PLT) je indeksna metoda za određivanje čvrstoće stijene pri opterećenju u točki, prikazano na slici 2.5. PLT je zamišljen kao indeksni test za klasifikaciju stijenjske mase izravno ili u korelaciji s jednoosnom tlačnom čvrstoćom. Rezultat ispitivanja je indeks čvrstoće $I_{s(50)}$ (MPa) prikazan formulom:

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45} * I_s \quad (2-3)$$

Gdje je:

$I_{s(50)}$ – indeks čvrstoće

D_e – dijametar uzorka (mm)



Slika 2.4 Princip ispitivanja PLT testom (Hrženjak, 2013)

Princip PLT testa sastoji se u tome da se uzorci stijene lome primjenom koncentriranog opterećenja preko para zaobljenih konusnih šiljaka. Ako je uzorak stijene u obliku jezgre tada se vrše takozvani "dijametralni" i "aksijalni" testovi, ako je u obliku rezanih blokova ili je nepravilan vrši se "blok test" ili "test nepravilnih uzoraka". Ispitivanje je moguće u laboratoriju i na terenu. Najprecizniji rezultati se dobivaju s dijametrom uzorka od 50 mm. Standardizirani prijenosni uređaj idealan je za brzo izvođenje pokusa na jezgri iz bušotina i to izravno na terenu.

2.2. Abrazivnost

Abrazivnost se može definirati kao trošenje ili kidanje čestica s površine, odnosno to je proces koji izaziva uklanjanje ili premještanje materijala sa tvrde podloge, koji uzrokuje trošenje posebno na alatima koji se koriste u rudarskim djelatnostima, bušenju i tuneliranju (Alber i sr., 2013).

Prema Labašu i sr. (2012) abrazija se može definirati kao trošenje ili kidanje čestica s površine alata. Abrazija je učinak fizikalno-mehaničkih svojstava stijena u dodiru s reznim alatom. Kako se svojstva alata razmatraju u interakciji alata i stijena, abrazivnost stijene je značajka koja ovisi o stanju rezanog alata. Zbog toga se učinak svojstava alata mora eliminirati tijekom određivanja abrazivnosti stijene laboratorijskim metodama. Odabir jedne vrste alata s unaprijed određenim fizikalnim i mehaničkim svojstvima za laboratorijsko ispitivanje, donosi rezultate abrazivnosti, karakterizirajući određenu vrstu stijene. Radna sredina gdje se interakcija odvija, također utječe na proces međusobne interakcije između alata i stijene. Učinak radne sredine nije zanemariv, stoga se mora osigurati stabilno okruženje u laboratorijskim uvjetima kako bi se eliminirao njegov sustavni učinak na globalne rezultate, uglavnom tijekom ispitivanja abrazivnosti različitih tipova stijena.

Prema Moradizadeh i sr.(2016), najvažnija svojstva obzirom na abrazivnost su:

- Vrsta stijene ili tla
- Mineralni sastav
- Veličina mineralnih zrna
- Čvrstoća i gustoća tla
- Snaga veza između čestica stijene

Atkinson i Singh (1986) spominju sljedeća svojstva koja utječu na abrazivnost:

- Mineralni sastav
- Tvrdća mineralnih zrna
- Oblik i veličina zrna
- Tip veziva
- Fizikalna svojstva stijene kao što su tvrdoća i čvrstoća

2.2.1. Ispitivanje abrazivnosti

Postoji nekoliko metoda za procjenu abrazivnosti stijena i minerala, od kojih su neke uspješnije i relevantnije. Podijeljene su u tri kategorije:

- Holistički pristupi - procjena abrazivnosti putem kombinacije temeljnih svojstava stijena i različitih procesnih parametara i uvjeta okoline,
- Neizravne metode - procjena abrazivnosti kroz kombinaciju tvrdoće, tlačne čvrstoće i drugih temeljnih svojstava stijena,
- Izravne metode - procjena abrazivnosti laboratorijskim ispitivanjima pomicanja uzorka stijene i alata rezanja koji su u kontaktu, pod standardnim kontroliranim ispitnim uvjetima (Labaš i sr., 2012).

Holistički pristup uzima u obzir strojne parametre, strukturu površine trošenja, raspodjelu veličine čestica, mehanička svojstva stijene, promjenu režima habanja, učinak temperature i vlažnosti itd. Holistički pristupi za procjenu abrazivnosti stijene su specifični za određenu opremu ili procese te su stoga ograničene vrijednosti za druge primjene (Labaš i sr., 2012).

Neizravna metoda procijene abrazivnosti ima prednost korištenja podatka koji su ili lako dostupni ili relativno jednostavni za dobivanje. Međutim, one ne uzimaju u obzir procesne varijable za određene načine trošenja. Kod neizravnih mjerenja, abrazivnost stijene se procjenjuje pomoću standardnih ispitivanja mehaničkih svojstava, kao što su: Schmidov čekić, Shoreov sklerometar, statički penetracijski pokus, jednoosna tlačna čvrstoća, indirektna vlačna čvrstoća, tvrdoća i žilavost stijene ili Vickersov test tvrdoće, Mohsova skala tvrdoće i volumne omjere različitih minerala u stijeni (Labaš i sr., 2012).

Izravne metode procijene abrazivnosti stijene koriste standardne uvjete za određivanje abrazivnosti u određenom načinu trošenja, bilo da se radi o malim ili velikim naprezanjima, ili abraziji uslijed udaraca. Ispitivanja proučavaju relativno kretanje uzorka stijene i alata koji se troši pri njihovom kontaktu. Ispitivanja se mogu primijeniti na uzorak stijene statički ili dinamički, uz relativno nisku brzinu uzorka/trošnog alata, te u mnogim slučajevima koriste abrazivne uvjete pri slabom kontaktu uzorka stijene i alata (Labaš i sr., 2012).

Ispitivanja abrazivnosti stijena i tla koja se koriste u današnje vrijeme podjeljena su u tri skupine (ISRM):

- Udarne ispitivanja - Los Angeles metoda, test pijeskom, Burbank test;
- Tlačna ispitivanja - Dorry test, ASTM 2-241-51 test, modificirani Dorry test, ispitivanje bušenjem, Taber Abraser model 143;
- Ispitivanja abrazivnosti - Deval test

Los Angeles metoda mjeri abrazivnost kao posljedicu udara komada stijene i čeličnih kugli u rotirajućem bubnju. Test pijeskom koristi čelične noževe od prekaljene legure koji se rotiraju brzinom od 632 o/min unutra bubnja s uzorcima stijene. Brzina bubnja je 74 o/min (Labaš i sr., 2012).

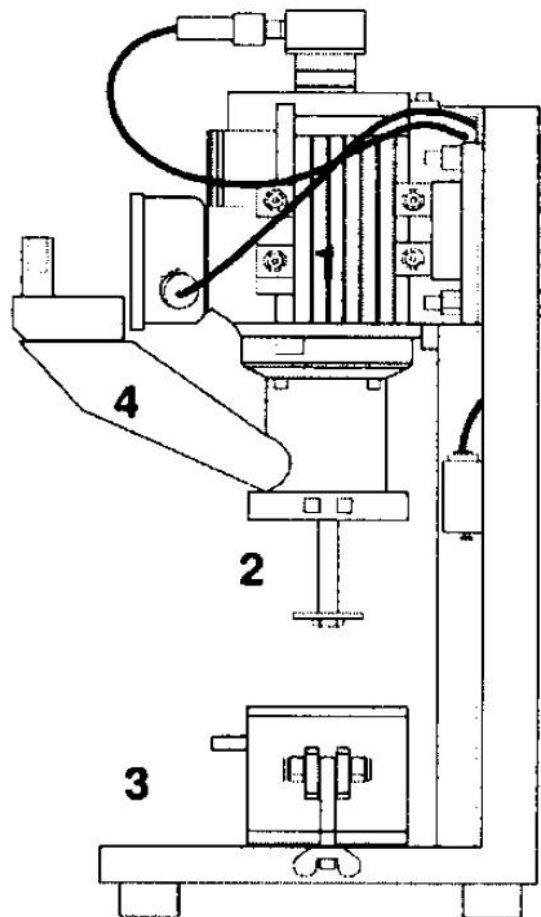
Dorry test, ASTM 2-241-51 test i modificirani Dorry test se izvode potiskivanjem uzorka stijene na rotirajući čelični disk s abrazivnim sredstvom (kvarcnim pijeskom, Al_2O_3 u prah) na površini. Ispitivanje bušenjem određuju trošenje bušećih krana u određenim vremenskim intervalima ili po duljini bušenja u unaprijed određenim uvjetima. Taber Abraser model 143 omogućava testiranje 6 mm debelog uzorka uzetog od NX jezgre koja se rotira 400 puta pod metalnim kotačem koji je otežan utegom od 250 g. Krhotine se odvajaju usisnim sustavom. Gubitak stijenske mase je mjera otpornosti stijene na abraziju i gubitak mase čeličnog kotača mjera abrazivnosti stijene. Test se koristi za predviđanje bušivosti strojeva za tuneliranje (Labaš i sr., 2012).

Ovi testovi se običajno koriste za procjenu abrazivnosti stijene u svrhu mehaničkog iskopa:

- CERCHAR test abrazivnosti,
- LCPC test abrazivnosti
- NTNU test abrazivnosti
- Ispitivanja abrazivnosti dubljenjem (Labaš i sr., 2012)

CERCHAR ispitivanje abrazivnosti razvijeno je 1973. od strane “Laboratoire du Centre d’Etudes et Recherchers des Charbonnages de France” (CERCHAR), koje je objavilo prve specifikacije ispitivanja u 1986. Čelična igla pod određenim pritiskom se povlači preko površine stijene. Habanje vrha igle predstavlja abrazivnost stijene, koja se klasificira s CERCHAR indeksom abrazivnosti (CAI) (Küpferle, 2015).

LCPC test (slika 2.6) uključuje uzimanje uzoraka stijena, tla ili sintetičkih materijala veličine zrna 4 - 6,3 mm. Metoda je razvijena u Centralnom laboratoriju za mostove i nasipe u Francuskoj (LCPC - Laboratoire Central de ponts et Chaussées, France). Krupniji materijal mora biti zdrobljen i prosijan. LCPC uređaj (slika 2.6) za ispitivanje abrazivnosti se sastoji od motora na kojem se nalazi metalni propeler, koji se rotira u metalnoj posudi (\varnothing 93 mm · 100 mm), a koja služi za uzimanje zrnatih uzoraka. Uzorak osušen na zraku, granulacije 4 - 6,3 mm (500 ± 2 g) dodaje se u cilindričnu posudu kroz cijev za doziranje. Pravokutni metalni propeler, veličine 50x25x5 mm, rotira u vremenskom periodu od 5 min brzinom od 4500 o/min u cilindričnoj posudi skupa s uzorkom. Standardizirana tvrdoća metala propelera po Rockwellu iznosi B 60-75. Propeler se mora izvagati prije i poslije ispitivanja. Gubitak mase metalnog propelera mjera je abrazivnosti uzorka. LCPC test daje LCPC indeks abrazivnosti (ABR). Koeficijent ABR se izračunava tako da se odredi koliki je gubitak mase metalnog propelera (g/t). ABR je izrazito nizak za meke, slabo abrazivne stijene, dok kod vrlo tvrdih i abrazivnih stijena premašuje 1500 g/t (Labaš i sr., 2012).

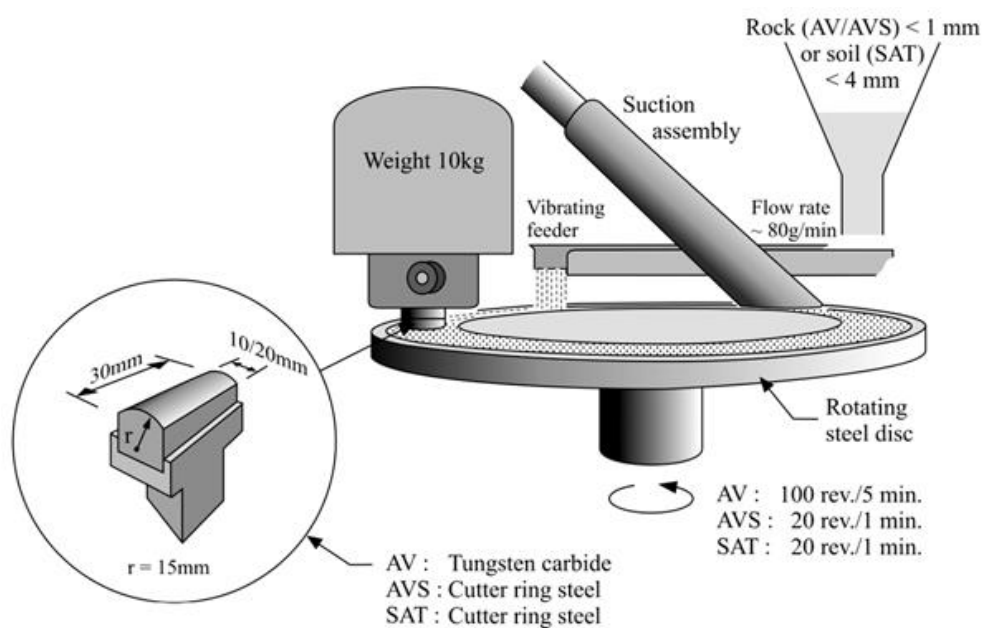


Slika 2.5 LCPC uređaj (Labaš i sr., 2012)

NTNU test abrazivnosti služi za procjenu bušivosti stijena pri udarnom bušenju, a razvijen je od strane Inženjersko-geološkog laboratorija Norveškog tehnološkog instituta (NTH) (kasnije preimenovan u NTNU - Norveško sveučilište znanosti i tehnologije). Ispitivanje abrazivnosti čestica zdrobljenih stijena manjih od 1,0 mm, kao što je prikazano na slici 2.7., uvedeno je zajedno s testom krtosti i Sievers-J testom za bušenje u svrhu procjene parametara bušivosti, indeksa brzine bušenja (DRI - *Index Drilling Rate*) i indeksa trošenja komada (BWI – *Bit Wear Index*). Kasnije su testovi korišteni za predviđanje trošenja tvrdih stijena koje su bušene TBM-om, prema metodi koju je razvio NTNU. Za predviđanje trošenja čeličnog rezača TBM-a koristi se ispitni komad čelika uzetog s prstena rezača koji se koristi u ispitivanju umjesto ispitnog komada volfram karbida (korišten za procjenu udarnog bušenja). Također, umjesto BWI indeksa, izračunava se indeks vijeka rezača (CLI - *Cutter Life Index*). Abrazivne vrijednosti AV/AVS predstavljaju abrazivnost volfram karbida/čeličnog rezača, koja ovisi o vremenu. Isti uređaj koji se koristi za mjerenje indeksa

abrazivnosti (*Abrasion Value* - AV), koristi se i za mjerenje indeksa abrazivnosti čelika (*Abrasion Value Steel* - AVS). Dva su ispitivanja definirana kao:

- AV - aritmetička sredina izmjerenih gubitaka težine volfram karbida, u mg, u 2 do 4 ispitivanja, nakon 5 minuta, tj. 100 okretaja uređaja,
- AVS - isto kako je opisano za AV, ali nakon 1 minute, tj. 20 okretaja uređaja (Labaš i sr., 2012).



Slika 2.6 NTNU uređaj (Labaš i sr., 2012.)

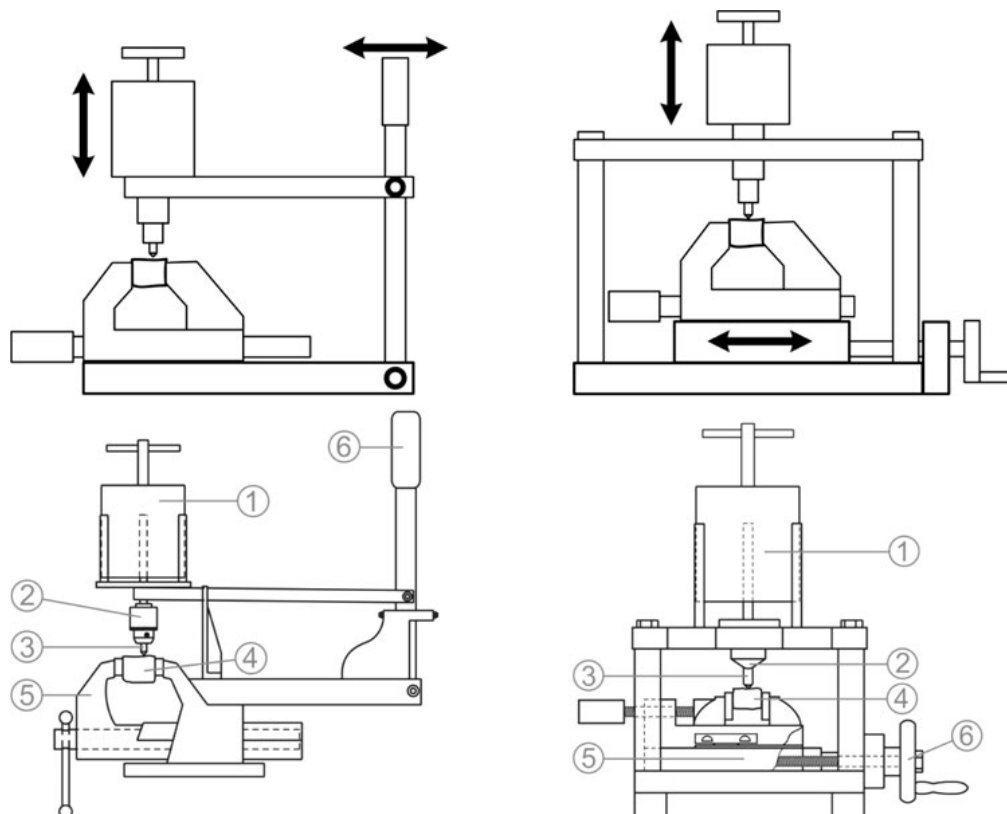
Test abrazivnosti rezanjem simulira abraziju pod vrlo velikom naprezanju te pri jakim udarnim uvjetima, i razvijen je u Centru za naprednu proizvođačku tehnologiju u Australiji (*Advanced Manufacturing Technologies Centre*). Plosnati pravokutni uzorak stijene je postavljen u držač uzorka. Čelični alat s oštrim konusom (90°) pričvršćen je na ruku njihala te je njegova putanja podešena tako da rezni alat prolazi preko površine kamenog uzorka pri njihanju. Držač uzorka može se pomicati vertikalno pomoću prijenosnog vijka, a vodoravno preko opružnog mehanizma. Rezni alat čvrsto je postavljen u držač ruke njihala. Ruka njihala oslobađa se iz početnog položaja te njezin vrh prelazi preko površine stijenskog uzorka pri padu njihala. Ispitni uzorci su pravokutni, duljine $80 \pm 0,5$ mm, a površina je ravna i glatka. Rezni alati izrađeni su od čelika, Rockwellove tvrdoće od HRC 40/42. Slično kao i kod određivanja abrazivnosti u CERCHAR testu, indeks abrazivnosti izračunava se

rezanjem (*Gouging Abrasion Index* - Gi) koji se dobiva kao aritmetička sredina promjera potrošenog alata, u mm, pomnožena s faktorom 10. Svaka od stijena testirana je tri do pet puta. Vrijednosti Gi variraju od 0,5 do 22 za testirane australske stijene. Rezultati ispitivanja mogu se koristiti za predviđanje brzina trošenja drobilica, alata u interakciji s tлом i diskova TBM-a (Labaš i sr., 2012).

2.2.2. Uređaj za ispitivanje Cerharovog indeksa abrazivnosti

Postoje temeljno dva različita mehanizma za stvaranje relativnog pomaka između igle i površine stijene. U izvornom CERCHAR dizajnu, i igla i uteg koji ju pritišće se kreću preko stacionarne površine stijene. U West-ovom dizajnu, uzorak stijene se kreće pod stacionarnom iglom. Slika 2.8 shematski opisuje način djelovanja oba dizajna. Glavne značajke oba uređaja za ispitivanje i njihova nomenklatura su također prikazani na slici 2.8. Posljedica razlike u dizajnu je blizu desetostrukoj razlici u trajanju ispitivanja između brze poluge pokretane s CERCHAR dizajnom u usporedbi sa sporim vijkom West dizajna (Alber i sr., 2013)

Oba stroja koriste kruti prihvati za učvršćivanje uzoraka stijene. Važno je osigurati da je aparat dovoljno učvršćen da bi se minimiziralo bilo kakvo lateralno kretanje tijekom ispitivanja. Statička sila od 70 N rezultat je utega stavljenog na iglu. Iglu treba pažljivo spustiti na površinu stijene, i postaviti okomito na površinu stijenskog uzorka. Trajanje ispitivanja koje uključuje pomicanje igle za 10 mm treba završiti unutar $1 \pm 0,5$ sekundi s aparatom tipa 1 i 10 ± 2 sekundi s aparatom tipa 2 (Alber i sr., 2013).



Slika 2.7 Osnovni mehanizmi i skice dvaju glavnih oblika ispitnih uređaja. Lijevo - originalni CERCHAR dizajn, desno - Westov dizajn (Alber i sr., 2013)

Dijelovi uređaja:

1. Utteg
2. Stezaljka
3. Igla
4. Uzorak
5. Prihvat
6. Poluga za pokretanje (Alber i sr., 2013.)

Igla bi trebala biti proizvedena od standardnog kroma-vandij legiranog čelika kaljenog do željene tvrdoće. Preporučava se korištenje igle temperirane na Rockwellovu tvrdoću $HRC\ 55 \pm 1$. Kako vrijednosti tvrdoće čeličnih igala postignute tijekom toplinske obrade može varirati, stvarna tvrdoća svake igle mora se mjeriti i zabilježiti najmanje jednom prije prve uporabe. Igla koja ima tvrdoću izvan granica tolerancije $HRC \pm 1$ ne smije biti korištena. Promjer igle mora biti najmanje 6 mm a njezina visina mora biti takva da je vidljivi dio igle između stezaljke i površine stijene tijekom ispitivanja najmanje 15 mm. Vrh igle mora imati

konusni kut od 90 °. Istrošena igla treba se ponovno naoštiti, a kut vrha provjeriti pod mikroskopom prije ponovne uporabe u sljedećim ispitivanjima (Alber i sr., 2013).

Uzorak stijene može biti ili u obliku diska ili nepravilnog oblika. Preporučuje se ispitivanje na svježe odlomljenoj površini stijene. Grube površine se mogu dobiti Brazilskim testom ili jakim udarcima čekićem na uzorku stijene. Alternativno, površina se može pripremiti rezanjem s dijamantnom žičnom pilom s vodenim hlađenjem. Ispitna površina treba biti očišćena od krhotina i odlomljenih zrna. Uzorak može biti zasićen, imati prirodni sadržaj vode ili biti osušen na zraku ili u peći. Na putu igle površinom uzorka ne smije biti vidljivih pukotina. Nema ograničenja s obzirom na veličinu zrna. Međutim, za stijene s veličinom zrna većom od 2 mm treba razmotriti veći broj ispitivanja. Put igle može dominirati veliko mineralno zrno i stoga pet pojedinačnih ispitivanja ne mora predstavljati puni mineralni sastav stijenskog uzorka. Veličina površine stijene treba biti dovoljna da dopusti pet testnih ispitivanja koja su najmanje 5 mm od ruba površine uzorka. Svako ispitivanje bi trebalo biti 5 mm udaljeno (Alber i sr., 2013).

Kod anizotropnih stijena, kao što je izraženo na primjeru uslojenosti, potrebno je dati posebnu pozornost na smjer grebanja. Predlaže se grebanje okomito na anizotropno svojstvo, kao i na anizotropnu površinu. Mjesto i smjer ispitivanja u bilo kojem uzorku trebaju biti odabrani da predstavljaju dominantne minerale i teksturu uzorka stijene promatrane u makroskopskim uzorcima (Alber i s.r, 2013).

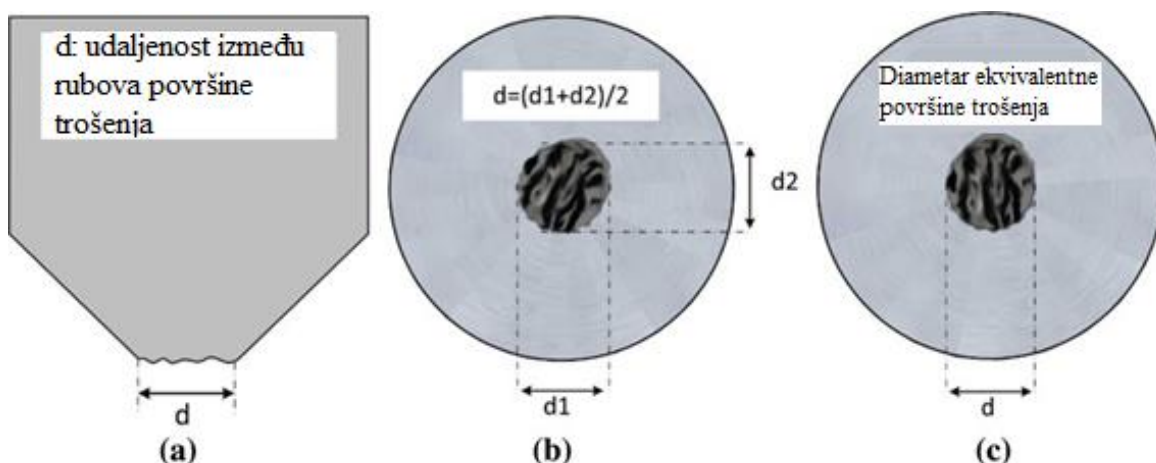
2.2.3. Postupak ispitivanja

Iglu treba pregledati mikroskopom prije ispitivanja. Treba provjeriti da li aparatura ispravno funkcionira. Uzorak treba biti čvrsto stegnut i promatrati željeni smjer grebanja. Uzorak bi trebao biti, u mjeri u kojoj je to moguće, horizontalan. Iglu treba pažljivo spustiti na površinu uzorka kako bi se izbjeglo bilo kakvo oštećenje vrha. Iglu treba postaviti tako da je okomita na površinu uzorka. Duljina ispitivanja uzorka stijene mora biti točno 10,0 mm. Ovisno o dizajnu uređaja za ispitivanja, trajanje ispitivanja treba biti 1 sekundu s tipom 1, odnosno, 10 sekundi s tipom 2 aparata (slika 2.8). Tijekom ispitivanja treba postojati konstantan kontakt između igle i stijene. U suprotnom, postoji vjerojatnost da će rezultat ispitivanja biti pogrešan pa se ispitivanje mora ponoviti s novom iglom (Alber i sr., 2013).

Nakon testiranja, iglu se treba pažljivo podignuti s površine stijene, i ukloniti je. Mjeri se zatupljenje vrha igle (slika 2.9) (Alber i sr., 2013). Mora se napraviti najmanje pet ponovljenih testova na površini stijene, svaki put s novom ili ponovno naoštrenom iglom. (Alber i sr., 2013).

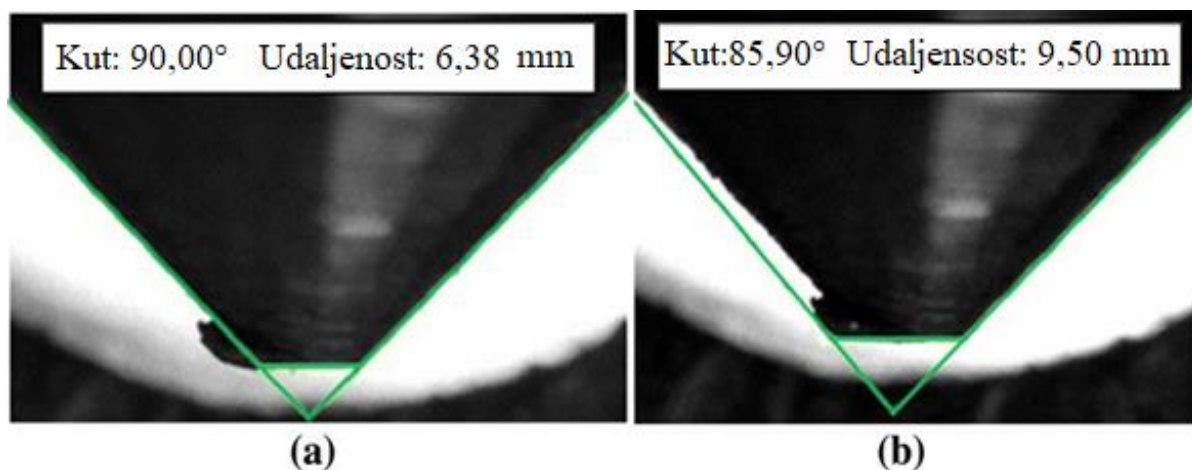
2.2.4. Mjerenje zatupljenja igle

Duljina ili promjer zatupljenosti trošenjem (d), mora se mjeriti ili optičkim ili digitalnim metodama pomoću mikroskopa s minimalnim povećanjem od $\times 25$. Razlučivost mjerenja mora biti barem $\pm 0,005$ mm s očitavanjima koja se očitavaju na najbliži 0,01 mm. Mjerenja mogu biti izvršena s bočnim pregledom ili gornjim prikazom, kao što je prikazano na slici 2.15 (Alber i sr., 2013).



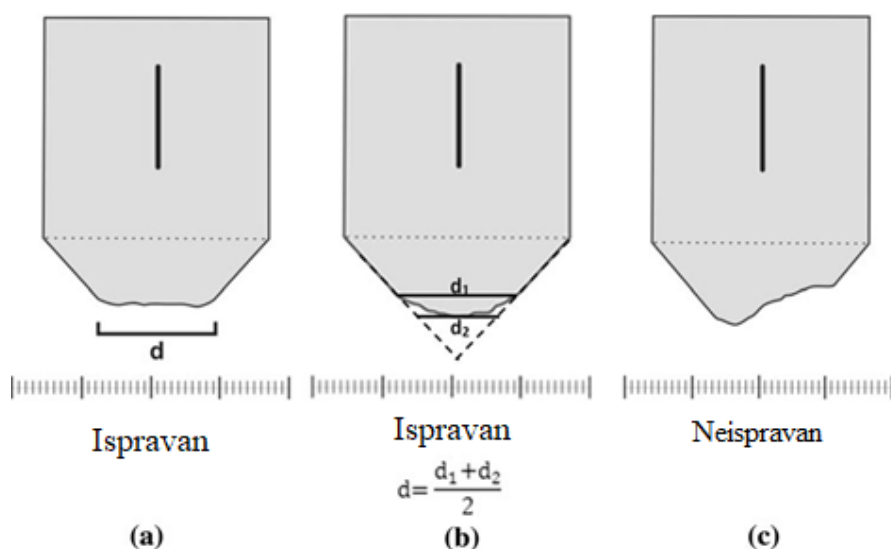
Slika 2.8 Mjerenje zatupljenja igle (Alber i sr., 2013.)

Bočna mjerenja se preporučuju za točnije rezultate. Kod ispitivanja svježe odlomljene površine stijene naročito kod čvrstih tipova stijena, može se često pojaviti trošenje asimetričnog oblika s krhotinama ili izobličenjima čelika koja se protežu izvan ravnine trošenja (kao što je prikazano na slici 2.10). Asimetričnost može utjecati na mjerenja otežavajući određivanje pravog promjera ravnine trošenja kada se koristiti gornji prikaz. Ispravno određivanje vršnih točaka zatupljenja, kao što tvrdi Rostami et al. (2005), ključno je za točnost testa, u suprotnom bi moglo doći do velikih varijacija između različitih operatora i laboratorija (Alber i sr., 2013.).



Slika 2.9 Asimetričnost vrha igle (Alber i sr, 2013.)

Profil zatupljene površine može, u nekim slučajevima, otežati procjenu mjerenja. Stoga se trebaju koristiti samo mjerenja dobivena standardnim površinskim profilima, a primjeri ovih standardnih profila prikazani su na slici 2.11 a-b. Mjerenja ne treba zabilježiti i treba se ponoviti ispitivanje u slučaju bilo kakvog izvan standardnog istrošenog profila kao što je prikazano na slici 2.11 c. (Alber i sr., 2013).



Slika 2.10 Profil zatupljene površine (Alber i sr, 2013.)

Kada se koristi metoda bočnog mjerenja, predlaže da igla bude postavljena u držač V oblika te da se mjerenja obavljaju svakih 90°. Mjerenja treba napraviti paralelno i okomito u smjeru grebanja (Alber i sr., 2013).

Dva mjerenja trebala bi se izvršiti pri korištenju metode gornjeg prikaza, kao što je prikazano na slici 2.11. Kada se koristi digitalna oprema, jedno mjerenje od gore je dovoljno (slika 2.11 c) (Alber i sr., 2013).

2.2.5. Izračun i klasifikacija CAI

Za svako mjerenje zatupljenosti igle (d), izračunava se CAI prema formuli:

$$CAI = d \times 10 \quad (2-4)$$

gdje je d površina zatupljenosti vrha igle izmjerena s točnošću od 0.01 mm. Vrijednost CAI je dobivena kao aritmetička sredina pet ili više ponavljanja ispitivanja zajedno sa standardnom devijacijom, kao što je prikazano u tablici 2.1. (Alber i sr., 2013).

Tablica 2-1 Primjer CERCHAR testa abrazivnosti s pet ponavljanja i četiri mjerenja istrošene površine bočnim prikazom (Alber i sr., 2013)

Br. Ispitivanja	1	2	3	4	5
Tvrdoća igle (HRC)	55	55	55	55	55
Mjerenje d ₁ (mm)	0,40	0,42	0,42	0,40	0,39
Mjerenje d ₂ (mm)	0,41	0,44	0,4	0,41	0,38
Mjerenje d ₃ (mm)	0,40	0,42	0,41	0,40	0,39
Mjerenje d ₄ (mm)	0,42	0,41	0,41	0,44	0,39
Mjerenje d _M (mm)	0,41	0,42	0,41	0,41	0,39
Aritmetička sredina (mm)					0,41
CERCHAR indeks abrazivnosti (CAI)					4,10
Standardna devijacija					0,11

Kad se koristi tvrdoća igle drugačija od preporučene (HRC 55 ± 1), oznaka simbola usvojena pri klasifikaciji CAI-a bit će CAI (x), gdje indeks x označava vrijednost tvrdoće u jedinicama Rockwell tvrdoće HRC. Simbol CAI primjenjuje se samo na vrijednosti

dobivene mjerenjima napravljenim s iglama tvrdoće od HRC 55 ± 1. Vrijednosti za CAI dobivene iglom drukčijom od HRC 55 može se pretvoriti pomoću jednadžbe koje su predložili Michalakopoulos i sur. (2006) ili Jacobs i Hagan (2009), (Alber i sr., 2013).

Ako je poznata duljina ili promjer habanja na vrhu igle za danu tvrdoću, tada se izračunava ekvivalentna vrijednost CAI ili CAI' na standardnu tvrdoću HRC 55 (Jacobs i Hagan, 2009; Alber i sr., 2013).

$$CAI' = 0.415 CAI_{(x)} / (1 - 0.0107x) \quad (2-5)$$

U tablici 2-2. prikazana je klasifikacija stijena prema abrazivnosti.

Tablica 2-2. Klasifikacija stijena prema abrazivnosti (Alber i sr., 2013).

Aritmetička sredina CAI	Klasifikacija
0,1-0,4	Ekstremno niska
0,5-0,9	Vrlo niska
1,0-1,9	Niska
2,0-2,9	Srednja
3,0-3,9	Visoka
4,0-4,9	Vrlo visoka
≥5	Ekstremno visoka

2.2.6. Nedosljednost ispitivanja

Prema Rostamiju i suradnicima (2013) nekoliko laboratorija za mehaniku stijena u Sjedinjenim Američkim Državama i u svijetu su bili pozvani da sudjeluju u ispitivanju Cercharovim testom na 7 uzoraka. U tablici koja se nalazi u dodacima su vidljivi rezultati ispitivanja.

Laboratoriji koriste različite metode i aparature za mjerenje CAI-a, te se očekuju određena odudaranja rezultata ispitivanja. Problem je kada su te razlike prevelike. U ispitivanju kvarcita sa iglom HRC 54-56 laboratoriji su odredili vrijednosti CAI u rasponu od 4.7 do 8.4, a u ispitivanju vapnenca u rasponu od 0.3 do 1.4. Razlike su u ovom slučaju prevelike, te kada se radi sa skupom podataka mjerenim u različitim laboratorijima može doći do povećeg rasipanja vrijednosti ispitivanja.

2.3. Poroznost

Predstavlja odnos volumena pora i ukupnog volumena tla ili stijena (ISRM, 1981). Definira se kao postotak šupljina u ukupnom volumenu stijenske mase. Dijeli se na primarnu i sekundarnu. Primarna poroznost je nastala za vrijeme postanka stijene dok je sekundarna poroznost nastala kao posljedica dijageneze i tektonskih pokreta. Prikazano formulom:

$$n = \frac{V_v}{V} * 100 (\%) \quad (2-6)$$

Gdje je:

n –Poroznost

V_v –ukupni volumen pora

V –Ukupni volumen uzorka

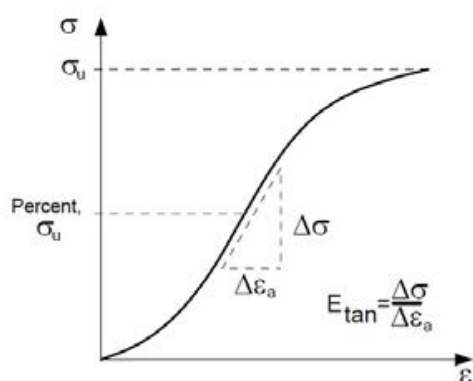
Ispitivanje se provodi na uzorcima od minimalno 50 g, na kocki dimenzija 3x3x3 cm³, ili na valjku s dijametrom od 2,5 cm a visinom od 5cm. Uzorak je u vodu uronjen i saturira se u vakuumu od manje od 800 Pa na najmanje sat vremena uz povremeno miješanje kako bi se oslobodio zatočeni zrak. Uzorak se vadi iz vode i briše se površina sa ovlaženom tkaninom te se pazi da se ne odlome fragmenti uzorka. Stavlja se u spremnik koji osigurava da ne dođe do gubitka mase zbog rukovanja te se uzorak skupa sa spremnikom važe da bi se dobila mokra masa. Potom se uzorak suši 24 sata na temperaturi od 105°C. Nakon hlađenja uzorka važe se opet skupa sa spremnikom da bi se dobila masa suhog uzorka (ISRM, 1981).

2.4. Youngov modul elastičnosti

Youngov modul elastičnosti (E), fizikalna veličina koja opisuje koliko se izduljena elastična tijela skraćuju ili produljuju pod djelovanjem sile ovisno o materijalu od kojega su načinjena; omjer je naprezanja pod djelovanjem vlačne sile i relativne promjene duljine.

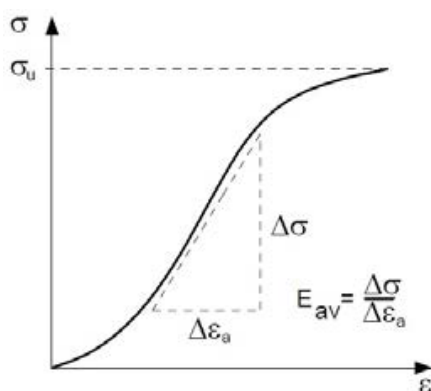
Modul elastičnosti vrlo je bitan u mehanici stijena jer ukazuje na krtost stijene, odnosno njezino ponašanje pri opterećenju. Postoje tri načina određivanja Youngovog modula elastičnosti a to su:

- Tangentni Youngov modul E_{\tan} - na određenom postotku maksimalnog naprezanja. Definira se kao nagib tangente na krivulju naprezanja na unaprijed određenom naprezanju kao što je prikazano na slici 2.12.



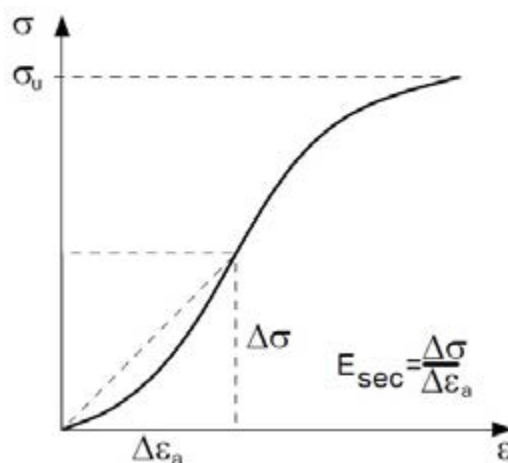
Slika 2.11 Tangentni Youngov modul E_{\tan} (Małkowski i Ostrowski, 2017)

- Prosječni Youngov modul E_{av} -na ravnom dijelu krivulje. Definira se kao nagib ravnog dijela krivulje naprezanja, prikazano na slici 2.13



Slika 2.12 Prosječni Youngov modul E_{av} (Małkowski i Ostrowski, 2017)

- Sekantni modul elastičnosti E_{sec} -na određenom postotku završnog ispitivanja. Definiran je kao nagib linije iz ishodišta do neke određenog postotka vršne snage, uglavnom 50%, prikazano na slici 2.14.



Slika 2.13 Sekantni modul elastičnosti E_{sec} (Małkowski i Ostrowski, 2017)

Ispitivanja se provode na valjkastim uzorcima koji imaju omjer visine naprema dijimetru približno 2,5:1, preferira se da dijametar nije manji od 54 mm. Ispitivanja se provode na 5 uzoraka. Vrlo je bitno da se maksimalno očuva prirodna vlažnost uzorka jer količina vode ima veliki utjecaj na rezultat. Uzorak se konstantno opterećuje sa 0,5 do 1 MPa/s. Opterećenje i uzdužna deformacija se snimaju na unaprijed određenim pravilnim intervalima tijekom testa. Očitavanja opterećenja i uzdužne deformacije se pretvaraju u opterećenje i naprezanje prema formulama:

$$\text{Tlačno opterećenje} = \frac{P}{A_0} [\text{MPa}] \quad (2-7)$$

$$\text{Uzdužna deformacija} = \frac{dL}{L_0} [\text{mm}] \quad (2-8)$$

2.5. Izotropija i anizotropija

Stijena se smatra izotropnom kada njezina svojstva ne ovise o njezinoj orijentaciji u odnosu na naprezanje, odnosno kada su mehanička svojstva stijene u svim smjerovima jednaka. Dok se stijena smatra anizotropnom kada svojstva stijene ovise o orijentaciji uzorka u odnosu na naprezanje. Većina stijena su anizotropne i u krutosti i u čvrstoći. Do pojave anizotropije dolazi zbog unutarnje građe stijene odnosno heterogenosti stijene.

Većina ispitivanja imaju uvijete rada za izotropne i za anizotropne. Zbog toga je nužno pozorno proučiti kakav je primjerak.

2.6. Brzina prolaza valova

Brzinom putovanja valova određuje se brzina kretanja longitudinalnih (P) valova i transverzalnih (S) valova kroz stijenu. Navedena brzina je izravno povezana s porozitetom i sadržajem vode. Postoje tri različite metode ispitivanja brzine putovanja valova:

- visokofrekventna ultrazvučna metoda,
- niskofrekventna ultrazvučna metoda
- rezonantna metoda.

Osim određivanja brzina prolaska ultrazvučnih elastičnih valova najčešće se određuju i dinamičke konstante elastičnosti, dinamički Youngov modul elastičnosti i Poissonov koeficijent te dinamički modul smicanja. Prikazano formulama:

$$v_p = \frac{h}{t_s} \text{ [m/s]} \quad (2-9)$$

$$v_s = \frac{h}{t_s} \text{ [m/s]} \quad (2-10)$$

gdje je:

h – visina uzorka [m]

t_p – vrijeme prolaska P-vala kroz uzorak [s]

t_s – vrijeme prolaska S-vala kroz uzorak [s]

Ispitivanje se provodi na uzorcima koji mogu biti u obliku pravilnih valjaka ili prizmi s odnosom visine i njegove širine koji bi trebao biti od 2 : 1 do najmanje 1 : 1. Ispitivanje se provodi na uzorcima s prirodnom vlažnošću. Da bi se ostvario prijenos elastičnih valova pretvornici moraju biti određeni u kontaktnom opterećenju s uzorkom od približno 10 N/cm². Uz to baze uzorka moraju biti dobro obrađene da se osigura dobar prijenos elastičnih valova. Za poboljšanje prijenosa valova površina uzorka može se premazati tankim slojem fine masti, glicerina ili ulja (Hrženjak i Briševac, 2009).

2.7. Ekvivalentni sadržaj kvarca

Ekvivalentni sadržaj kvarca (EQC) je jedna od metoda izražavanja tvrdoće stijene. Količina kvarca i drugih minerala u sastavu stijene se dobije mikroskopskom analizom. Izražava se u postotku. Izračunava se prema izrazu

$$EQC = \sum_{i=1}^n A_i R_i [\%] \quad (2-11)$$

gdje je:

A_i – sadržaj minerala (%)

R_i – Rosiwalova abrazivnost (%)

n – broj minerala

Određivanje ekvivalenta sadržaja kvarca je široko rasprostranjeno među proizvođačima alata, inženjerima i geolozima. Također je uspostavljeno da stupanj trošenja alata raste s povećanjem ekvivalentnog sadržaja kvarca.

2.8. Gustoća

Gustoća je jedna od osnovnih značajki stijena. Gustoća kamena je odnos mase uzorka i volumena čvrstog dijela uzorka pri određenoj temperaturi i tlaku, a izražava se u g/cm^3 ili kg/m^3 prema formuli. Ima vrlo značajan utjecaja na mehanička svojstva stijena.

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (2-12)$$

Gdje je

ρ –gustoća (kg/m^3)

m – masa (kg)

V – volumen (m^3)

Ispitivanje se provodi prema preporučenim metodama ISRM-a za određivanje sadržaja vode, poroznosti i gustoće na uzorcima pravilnih oblika (ISRM, 1981). Metoda se koristi samo kod čvrstih koherentnih, strojno obradivih uzoraka stijena pravilne geometrije koji pri sušenju ili potapanju u vodi značajno ne bubre i ne raspadaju se. Metoda je naročito pogodna kod pravilnih uzoraka na kojima se provode i druge metode ispitivanja.

Za ovo određivanje potrebna su najmanje tri reprezentativna uzorka stijene koji se mogu strojno tako obraditi da zadovoljavaju geometriju pravilnoga valjka ili prizme. Minimalne dimenzije svakog uzorka moraju biti takve da masa uzorka bude ili najmanje 50 g ili takve da najmanja dimenzija bude najmanje deset puta veća od dimenzije najvećeg zrna.

2.9. Tvrdća

Tvrdća je otpor tijela prodiranju drugog tijela u njegovu površinu. Također se još može definirati i kao otpor materijala prema plastičnim deformacijama. Tvrdća se izražava Mohs-ovom skalom koja se sastoji od deset minerala poredanih prema tvrdoći u tablici 2.1. Tvrdća po Mohs-ovoj skali je relativna tvrdoća koja primjenu nalazi u mineralogiji.

Za određivanje tvrdoće koriste se ispitivanja:

- Pokus struganja (*scratch* pokus). Rezultat ispitivanja izražava se na Mohs-ovoj skali koja koristi 10 minerala. Na toj skali talk je najmekši ($H=1$) a dijamant je najtvrdi ($H=10$).
- Pokus utiskivanja (*indentation test*). Kod ovog pokusa utiskuje se kugla, piramida ili stožac u površinu uzorka. Koriste se tehnike Brinell-a, Vickers-a, Knoop-a i Rockwell-a koje su razvijene u metalurgiji.
- Uređaji koji rade na principu odskoka (Schmidtov čekić i skleroskop).
- Pokusi kojima se određuje abrazivnost.

Tablica 2-3 Mohsova skala tvrdoće

Mohs-ova tvrdoća	Mineral
1	Talk
2	Gips
3	Kalcit
4	Flourit
5	Apatit
6	Ortoklas
7	Kvarc
8	Topaz
9	Korund
10	Dijamant

2.10. Tvrdoća po Shore-u

Tvrdoća po Shore-u zasniva se na mjerenju elastičnog odskoka mase s čeličnim ili dijamantnim vrhom pri padu na ispitivani uzorak s određene visine i mjeri se visina odskoka. Visina odskoka je proporcionalna tvrdoći materijala. Shore tvrdoća (SH) prihvaćena je kao prikladna i ne razorna metoda mjerenja tvrdoće stijena.

3. PROVEDENA ISPITIVANJA

Kahraman i suradnici su 2010 proveli ispitivanja pod nazivom: „Upotrebljivost Cerharovog indeksa abrazivnosti za procjenjivanje jednoosne tlačne čvrstoće i Youngovog modula Misiskih Breča: Regresijska i analiza neuronskom mrežom“. Uzorci stijene na kojoj su obavljena istraživanja dolaze iz pokrajine Adane u blizini grada Misis na samom jugu Turske. Uzorci za ispitivanje su prikupljeni na terenu i transportirani u laboratorij. Breča se sastoji od dolomitiranih vapnenih blokova koji se nalaze u sitnozrnatom matriksu crvenih glinenaca bogatih željezom. Ispitivanja su provedena na 125 uzoraka, a dobiveni rezultati se mogu vidjeti u tablici 3-1. Treba napomenuti da se u tablici nalaze srednje vrijednosti i ekstremne vrijednosti. Kahraman je proveo i druga ispitivanja ali su u radu prikazana samo neka.

Tablica 3-1 Vrijednosti ispitivanja provedena od Kahramana i suradnika

	CAI	UCS (MPa)	Brzina prolaska P valova (m/s)	Brzina prolaska S valova (m/s)	Gustoća (g/cm ³)
Minimum	0.00	9.1	3,490	1,440	2.36
Maksimum	0.83	108.1	6,660	3,240	2.64
Sr. vrijednost	0.26	44.7	4,820	2,410	2.50

Rostami i suradnici su proveli istraživanja 2011. godine pod nazivom: „Studija dominantnih faktora koji utječu na Cerharov indeks abrazivnosti“. Ispitivanja su provedena na 66 uzoraka izuzetih od 7 vrsta stijena, te su rezultati ispitivanja prikazani u tablici 3-2. Ispitivanja su provedena s iglama čvrstoće HRC 55 i HRC 42, na ispiljenoj površini i svježje odlomljenoj površini. Fizičko mehanička svojstva stijena se nalaze u tablici 3-3.

Tablica 3-2 Rezultati ispitivanja provedena od Rostamia i suradnika

Vrsta stijene	CAI 41/43 ispiljena	CAI 41/43 sviježa	CAI 54/56 ispiljena	CAI 54/56 sviježa	UCS (MPa)	BTS (MPa)
Vapnenac	0.2	0.3	0.1	0.2	36.0	3.4
Škriljevac	1.3	1.3	0.7	0.6	121.0	
Kalcit	1.7	1.5	1.0	0.7	68.0	5.1
Mramor	2.1	2.1	1.0	1.0	133.0	11.1
Pješčenjak	4.0	3.7	2.4	3.3	127.0	8.6
Granit	4.6	5.6	4.7	4.2	184.0	7.8
Kvarcit	3.3	8.1	2.7	5.7	291.0	17.9

Tablica 3-3 Ostala fizičko-mehanička svojstva ispitana od Rostamia i suradnika

Vrsta stijene	Gustoća (g/cm ³)	Poroznost (%)	E (GPa)	Poiss. koef.	Brzina P-valova (m/s)	Brzina S-valova (m/s)	EQC (%)
Vapnenac	2.04	18.8	17	0.19	4,174	2,139	4
Škriljevac	2.75	0.9	75	0.17	7,504	3,475	2
Kalcit	2.71	0.2	41	0.22	4,249	2,804	4
Mramor	2.68	0.3	67	0.25	4,989	3,318	4
Pješčenjak	2.62	2.5	21	0.25	3,528	2,586	54
Granit	2.64	0.6	49	0.18	5,129	2,691	58
Kvarcit	2.63	0.5	70	0.09	6,856	3,753	100

U istom ispitivanju navedena je sljedeća tablica, tablica 3-4 u kojoj se nalaze vrijednosti za osam vrsta stijene. Podaci su preuzeti iz literature, i prikazuju tipične vrijednosti fizikalno– mehaničkih svojstava stijene.

Tablica 3-4 Tipične vrijednosti

Vrsta stijene	CAI-54 ispiljena	CAI-54 svježa	UCS (MPa)	EQC (%)
Tonalit	3.23	3.25	112.00	48.00
Vapnenac	1.15	1.02	77.00	2.00
Gnajs	2.57	2.18	62.00	71.00
Granit/pegmatit	2.71	2.99	100.00	56.00
Amfibolit/ škriljavci	3.56	3.79	137.00	40.00
Aplit/ sitnozrnati granit	3.12	3.29	140.00	84.00
Bazalt	2.37	2.49	83.00	32.00
Kvarcit	2.34	3.63	165.00	100.00

Kahraman i suradnici su 2014 objavili istraživanje: „Upotrebljivost Cerharovog indeksa abrazivnosti za procjenjivanje troosne tlačne čvrstoće Misiskih Breča“. U tablici 3-5 su prikazani rezultati ispitivanja. Ova ispitivanja nisu uvrštena u analizu jer su jedina koja imaju troosnu tlačnu čvrstoću, te su u studiji dane samo ekstremne vrijednosti i prosjeci za 41 ispitani uzorak.

Tablica 3-5 Ispitivanja troosne tlačne čvrstoće

	UCS ₃ (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	Brzina P- valova (km/s)	Brzina S- valova (km/s)	Gustoća (g/cm ³)	CAI
Broj uzoraka	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00
Minimum	26,40	20,10	3,71	1,69	2,35	0,00
Maksimum	112,40	48,40	5,59	2,69	2,58	0,70
Prosjek	62,90	36,70	4,86	2,33	2,48	0,40

He i suradnici su 2015. objavili istraživanje: „Studija korelacije abrazivnosti i mehaničkih svojstva stijene kombiniranih s mikrostrukturnim karakteristikama. Ispitivano je 20 uzoraka različitih vrsta stijena. U tablici 3-6 prikazani su rezultati ispitivanja He i suradnika.

Tablica 3-6 Rezultati ispitivanja provedenih od He i suradnika

Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	E (GPa)	EQC (%)
Mramor	1.39	98.20	5.90	25.10	3.61
Mramor	1.48	112.50	6.80	24.30	1.97
Tuf	2.26	313.20	16.00	29.10	84.34
Tuf	2.22	273.30	13.84	26.40	78.88
Diorit	2.75	171.20	5.30	46.40	49.16
Sijenit - granit	2.76	138.10	6.30	22.10	51.49
Sitnozrnati pješčenjak	1.22	118.80	4.60	17.20	50.44
Sitnozrnati pješčenjak	1.91	136.20	7.80	17.56	22.31
Muljnjak	1.03	9.50	0.79	10.00	15.94
Muljnjak	1.05	22.50	1.60	11.20	12.75
Monzonit - granit	2.62	203.55	10.18	20.30	59.66
Monzonit - granit	2.65	238.56	10.80	23.50	58.28
Monzonit - granit	2.32	208.64	10.43	21.20	59.65
Feldspatski pješčenjak	2.22	105.40	5.10	11.50	54.63
Kvarcni pješčenjak	2.32	173.55	8.68	18.30	91.86
Pješčenjak	1.83	206.70	10.23	19.30	28.62
Sitnozrnati pješčenjak	2.85	163.83	7.19	23.80	73.31
Sitnozrnati pješčenjak	2.38	178.12	7.41	19.20	78.35
Sitnozrnati pješčenjak	1.32	119.46	3.56	16.35	17.93
Sitnozrnati pješčenjak	1.65	132.24	3.80	10.64	14.68

Za ispitivanje se koristila igla čvrstoće HRC 43, te su rezultati CAI preračunati za vrijednost HRC 55 prema formuli za preračunavanje CAI-a.

Moradizadeh i suradnici su 2016. objavili istraživanje: „Korelacija ekvivalentnog sadržaja kvarca, Slakeovog indeksa i opterećenja u točki s Cerharovim indeksom abrazivnosti za različite vrste stijena“. U ispitivanju su uzeti uzorci različitih geoloških formacija iz Irana. Uzeto je 8 uzoraka metamorfnih stijena, 10 uzoraka magmatskih stijena i 18 uzoraka sedimentnih stijena. U tablici 3-7 prikazani su rezultati ispitivanja provedenih od Moradizadeha i suradnika. Ova studija nije uvrštena u ispitivanje jer nema ispitivanja UCS-a i BTS-a koji se koriste u ovom radu.

Tablica 3-7 Rezultati ispitivanja Moradizadeha i suradnika

Vrsta stijene	Q%	EQC%	Is50 (MPa)	Id2%	S%	CAI
Sijenit - granit	50.00	60.50	9.96	99.71	0.09	4,47
Granodiorit	47.00	61.86	6.12	99.63	0.14	4,48
Monzogranit	52.00	65.61	10.92	99.75	0.18	4,60
Sijenit - granit	45.00	58.87	5.81	99.82	0.42	4,22
Diorit	14.00	41.84	9.16	99.80	0.60	3,81
Granodiorit	42.00	50.28	5.30	99.77	0.47	4,00
Andezit	0.00	55.89	9.88	99.77	0.09	4,00
Tuf	1.50	51.94	9.89	99.72	1.42	3,23
Tuf	8.50	51.95	9.84	99.77	1.55	3,56
Kvarcit	9.00	61.76	10.32	99.10	1.98	4,40
Mramor	0.00	3.00	263	99.49	0.11	1,10
Škriljevac	44.00	54.87	10.72	99.79	0.07	4,35
Škriljevac	52.00	53.82	5.53	99.75	0.43	3,71
Škriljevac	7.00	16.36	0.80	97.28	1.70	0,78

Tablica 3-7 Rezultati ispitivanja Moradizadeha i suradnika – nastavak

Vrsta stijene	Q%	EQC%	Is50 (MPa)	Id2%	S%	CAI
Škriljevac	48.00	50.08	7.10	99.69	0.29	3,39
Škriljevac	25.00	33.33	5.99	99.86	0.51	2,84
Serpentinit	0.00	4.18	5.26	99.53	0.47	1,22
Gnajs	65.00	70.96	6.27	99.74	0.21	4,40
Kalcitni konglomerat	32.00	33.58	7.98	99.46	2.12	2,23
Kvarcni arenit	87.00	87.17	11.78	99.72	0.75	4,10
Kvarcni arenit	72.00	72.01	10.95	99.76	0.88	3,75
Pješčenjak	28.00	30.68	2.30	92.74	4.39	1,93
Kvarcni arenit	87.20	87.20	10.67	99.90	1.20	4,18
Kvarcni arenit	73.60	73.60	10.80	99.76	1.63	3,78
Subarkoza	85.00	85.06	12.42	99.88	0.51	4,31
Litični arenit	50.00	50.00	4.97	99.21	2.94	2,05
Litični arenit	57.00	57.00	4.76	99.05	4.23	2,19
Pješčenjak	63.40	63.40	9.36	99.69	0.14	2,93
Vapnenac	0.00	3.38	7.23	99.81	1.17	1,90
Vapnenac	0.20	4.05	8.75	99.71	0.60	1,97
Vapnenac	0.60	3.47	2.81	99.21	2.53	1,07
Vapnenac	0.00	2.96	5.31	99.66	1.13	1,33
Vapnenac	0,00	2.88	4.59	99.14	3.55	1,22
Vapnenac	2.80	5.87	5.99	99.87	0.12	1,48
Vapnenac	0.00	2.25	4.19	99.61	0.14	1,41
Vapnenac	1.80	3.79	4.85	99.77	0.21	1,43

U tablici 3-7 Q je oznaka za sadržaj kvarca, Is_{50} za point load test, Id_2 za Slakeov test izdržljivosti, S vlažnost uzorka.

Ko i suradnici su 2016. objavili: „Efekt geomehaničkih svojstava na CERCHAR indeksa abrazivnosti i aplikacija za TBM tuneliranje“. Uzorci za ispitivanje odnosno podaci su preuzeti iz literature, a uzorci dolaze iz različitih područja svijeta, odnosno Sjeverne Amerike, istočne Azije i sjeverne Europe. Ispitivanja su provedena na 50 uzoraka magmatskih stijena i 66 uzoraka metamorfnih stijena. Rezultati ispitivanja magmatskih stijena su prikazana u tablici 3-8.

Tablica 3-8 Rezultati ispitivanja magmatskih stijena Koa i suradnika

Vrsta stijene	CAI	EQC(%)	UCS(MPa)	BTS(MPa)
Granit	3.30	26.00	128.00	6.50
Granit	4.30	14.00	165.90	7.80
Granit	3.90	23.00	164.70	6.40
Granit	3.70	35.00	18.20	6.90
Pegmatit	2.80	7.00	83.40	10.10
Granit	4.50	17.00	191.60	6.70
Granit	2.80	17.00	65.70	5.20
Granit	3.20	35.00	188.20	7.90
Pegmatit	2.90	33.00	182.20	5.90
Pegmatit	2.80	22.00	102.70	10.30
Pegmatit	3.50	18.00	130.40	9.30
Granit	3.50	15.00	203.20	6.70
Granit	3.30	18.00	156.80	7.70
Granit	3.20	16.00	247.30	12.00
Granit	2.80	17.00	164.60	9.80
Granit	2.80	20.00	126.90	9.40

Tablica 3-8 Rezultati ispitivanja magmatskih stijena Koa i suradnika - nastavak

Vrsta stijene	CAI	EQC(%)	UCS(MPa)	BTS(MPa)
Granit	3.90	18.00	161.60	7.80
Granit	3.80	25.00	111.40	6.30
Granit	4.00	22.00	163.10	8.00
Granit	3.00	25.80	178.00	8.00
Granit	2.90	37.60	171.00	9.00
Granit	2.80	30.80	146.00	8.00
Granit	2.70	26.20	135.00	7.00
Granit	3.10	31.00	177.00	8.00
Granit	2.40	29.50	151.00	10.00
Propilit	2.60	17.90	159.00	12.00
Granoporfir	2.40	19.40	196.00	14.00
Diorit	2.70	7.50	235.00	15.00
Gabro	2.60	2.40	110.00	8.00
Granit	2.00	40.00	76.60	7.20
Granit	2.00	30.00	29.60	8.40
Granit	1.90	20.00	46.50	13.70
Granit	1.90	35.00	44.10	11.80
Granit	1.60	44.00	126.10	14.90
Granit	1.30	47.00	99.40	11.40
Granit	0.80	45.00	54.20	2.00
Granit	1.70	39.00	31.60	10.70
Granit	1.30	31.00	66.30	18.40
Granit	1.10	10.00	148.40	14.90

Tablica 3-8 Rezultati ispitivanja magmatskih stijena Koa i suradnika - nastavak

Vrsta stijene	CAI	EQC(%)	UCS(MPa)	BTS(MPa)
Granit	1.80	61.00	60.80	4.20
Pegmatit	4.20	78.00	104.40	
Granit	3.80	43.00	179.10	
Pegmatit	3.20	29.00	50.12	
Pegmatit	3.50	24.00	224.00	
Granit	3.90	23.00	164.70	
Pegmatit	3.80	30.00	138.80	
Granit	4.60	14.00	136.70	
Granit	4.80	18.00	71.70	
Granit	4.60	24.00	176.40	
Granit	1.70	5.00	21.90	

Rezultati ispitivanja metamorfnih stijena su prikazani u tablici 3-9.

Tablica 3-9 Rezultati ispitivanja metamorfnih stijena Ko i suradnika

Vrsta stijene	CAI	EQC (%)	UCS (MPa)	BTS (MPa)
Gnajs	4.00	35.00	125.60	12.70
Gnajs	4.20	27.00	149.50	11.80
Gnajs	4.20	27.00	149.50	11.80
Škriljevac	4.30	50.00	68.60	18.60
Škriljevac	2.30	19.00	34.70	6.10
Škriljevac	3.60	37.00	55.20	16.10
Škriljevac	1.50	29.00	21.60	2.70
Škriljevac	2.20	57.00	27.70	5.00

Tablica 3-9 Rezultati ispitivanja metamorfnih stijena Ko i suradnika – nastavak

Vrsta stijene	CAI	EQC (%)	UCS (MPa)	BTS (MPa)
Škriljevac	2.90	26.00	50.00	7.60
Škriljevac	2.90	35.00	39.90	8.30
Škriljevac	2.50	39.00	19.80	6.70
Škriljevac	3.40	14.00	47.70	8.20
Škriljevac	3.60	25.00	112.00	6.80
Škriljevac	3.00	16.00	107.50	8.90
Škriljevac	2.20	35.00	13.60	3.50
Škriljevac	4.00	30.00	108.90	13.80
Gnajs	4.50	20.00	204.90	10.10
Škriljevac	2.50	30.00	48.70	7.40
Škriljevac	3.30	50.00	118.80	15.80
Škriljevac	2.70	55.00	20.60	8.10
Škriljevac	2.90	23.00	27.00	4.90
Škriljevac	3.10	14.00	80.70	9.90
Škriljevac	3.00	12.00	112.40	10.50
Škriljevac	2.40	17.00	46.80	5.50
Škriljevac	3.00	21.00	108.60	11.20
Škriljevac	2.90	26.00	65.00	9.40
Škriljevac	2.90	16.00	46.70	4.30
Škriljevac	2.50	16.00	72.50	6.20
Škriljevac	2.70	12.00	112.80	7.50
Škriljevac	3.00	18.00	53.30	4.30
Škriljevac	3.00	19.00	83.70	8.90

Tablica 3-9 Rezultati ispitivanja metamorfnih stijena Ko i suradnika – nastavak

Vrsta stijene	CAI	EQC (%)	UCS (MPa)	BTS (MPa)
Škriljevac	3.80	17.00	112.80	11.50
Škriljevac	2.80	38.00	62.10	6.30
Škriljevac	2.70	60.00	44.80	5.00
Škriljevac	2.30	22.00	78.60	5.40
Škriljevac	2.30	12.00	90.60	6.80
Škriljevac	2.20	56.00	39.00	5.70
Škriljevac	2.20	30.00	92.40	3.60
Amfibolit	3.50	38.00	128.50	
Gnajs	3.30	5.00	145.30	
Gnajs	5.10	31.00	91.80	
Gnajs	3.70	40.00	116.50	
Gnajs	4.30	42.00	130.50	
Gnajs	4.20	36.00	160.80	
Amfibolit	3.50	6.00	211.60	
Gnajs	3.60	27.00	158.80	
Gnajs	3.40	30.00	177.30	
Gnajs	4.20	35.00	157.00	
Gnajs	4.20	27.00	119.20	
Amfibolit	4.00	7.00	227.30	
Amfibolit	3.90	13.00	139.20	
Gnajs	4.30	33.00	120.80	
Gnajs	4.00	34.00	98.00	
Gnajs	4.40	9.00	95.70	

Tablica 3-9 Rezultati ispitivanja metamorfnih stijena Ko i suradnika – nastavak

Vrsta stijene	CAI	EQC (%)	UCS (MPa)	BTS (MPa)
Gnajs	3.40	23.00	186.70	
Amfibolit	3.20	6.00	268.10	
Gnajs	3.80	43.00	179.10	
Gnajs	4.00	35.00	125.60	
Gnajs	4.20	27.00	149.50	
Kvarcit	4.20	78.00	104.40	
Škriljevac	4.40	60.00	75.00	
Škriljevac	2.30	51.00	51.00	
Škriljevac	3.10	14.00	37.60	
Škriljevac	2.90	35.00	39.90	
Gnajs	4.50	20.00	204.90	
Škriljevac	2.30	14.00	64.30	

Er i Tugrul su 2016. objavili studiju: “Korelacija fizikalno-mehaničkih svojstava granitnih stijena s CERCHAR indeksom abrazivnosti u Turskoj“. Uzorci stijena za ispitivanje prikupljeni su s 12 lokacija, a najviše sa sjevero-zapada Turske. Uzorci su dobiveni od granitnih stijena. Rezultati ispitivanja se nalaze u tablici 3-10.

Tablica 3-10 Rezultati ispitivanja Era i Tugrula

Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	EQC (%)	Brzina P-valova (m/s)
Granit	5.22	110.00	14.88	25.10	4,712
Granit	5.06	95.00	11.28	21.10	4,323
Granit	5.03	98.00	11.34	19.30	4,309

Tablica 3-10 Rezultati ispitivanja Era i Tugrula

Vrsta stijene	CAI	UCS(MPa)	BTS(MPa)	EQC (%)	Brzina P-valova (m/s)
Granit	5.67	124.00	16.41	28.40	5,355
Granit	5.34	115.00	15.64	25.20	5,177
Granit	5.29	110.00	14.50	18.90	4,790
Granit	5.12	105.00	12.19	6.80	4,476
Granit	5.10	94.00	11.25	21.70	4,177
Granit	4.65	102.50	12.02	5.60	4,204
Granit	5.14	105.00	12.68	29.10	4,401
Granit	6.82	141.50	17.45	34.80	5,322
Granit	5.07	95.00	10.64	5.20	4,051

Abu Bakar i sr. objavili su 2016. studiju: “Utjecaj sadržaja vode na CERCHAR indeks abrazivnosti“. Uzorci su uzeti od 33 sedimente stijene s različitih lokacija u Pakistanu. Indeks abrazivnosti je mjereno na saturiranim i ne saturiranim uzorcima. Rezultati ispitivanja utjecaja sadržaja vode na vrijednost CAI su prikazani u tablici 3-11.

Tablica 3-11 Rezultati ispitivanja Abu Bakara i suradnika

Vrsta stijene	CAI _(suh)	CAI _(sat)	UCS _(suh) (MPa)	UCS _(sat) (MPa)	BTS _(suh) (MPa)	BTS _(sat) (MPa)
Siltit	1.87	1.56	57.90	56.10	9.00	6.80
Siltit	1.25	1.03	49.30	17.30	7.40	2.00
Siltit	2.84	2.67	127.60	85.30	6.40	2.50
Siltit	2.39	1.55	82.80	62.00	6.00	3.90
Pješčenjak	1.76	1.31	39.80	19.10	1.80	2.10
Pješčenjak	1.22	1.04	26.70	13.60	1.40	0.90

Tablica 3-11 Rezultati ispitivanja Abu Bakara i suradnika – nastavak

Vrsta stijene	CAI _(suh)	CAI _(sat)	UCS _(suh) (MPa)	UCS _(sat) (MPa)	BTS _(suh) (MPa)	BTS _(sat) (MPa)
Pješčenjak	0.86	0.94	41.60	26.20	0.50	0.10
Pješčenjak	1.45	1.37	69.00	43.70	6.10	3.90
Pješčenjak	2.28	2.32	44.00	40.30	2.80	2.70
Pješčenjak	3.21	2.36	109.70	66.30	6.00	1.20
Pješčenjak	1.39	1.69	61.50	58.00	7.30	2.60
Pješčenjak	1.15	1.24	27.10	23.60	1.60	1.40
Pješčenjak	2.61	2.16	29.00	14.20	1.90	1.80
Pješčenjak	1.44	1.26	16.70	13.00	0.70	1.00
Pješčenjak	1.50	1.80	21.20	19.70	2.10	2.00
Pješčenjak	1.25	1.19	11.00	17.50	1.30	1.00
Pješčenjak	1.81	1.32	46.40	30.60	1.60	1.80
Pješčenjak	1.31	1.04	17.10	4.80	0.86	0.88
Pješčenjak	2.91	2.15	56.80	60.90	4.20	1.40
Siderit	1.02	0.98	51.70	38.80	8.10	4.10
Dolomit	1.61	1.39	61.80	33.50	6.50	3.90
Dolomit	1.79	1.61	144.40	67.70	12.00	8.20
Dolomit	1.90	2.17	99.90	55.50	12.50	4.70
Dolomit	2.15	1.36	132.70	57.90	6.70	3.80
Vapnenac	1.06	0.86	65.30	60.90	5.00	1.20
Vapnenac	0.94	0.81	95.80	48.70	4.60	2.60
Vapnenac	1.46	0.99	80.70	29.60	5.60	5.40
Vapnenac	0.70	0.53	69.90	32.20	3.30	2.80

Tablica 3-11 Rezultati ispitivanja Abu Bakara i suradnika – nastavak

Vrsta stijene	CAI _(suh)	CAI _(sat)	UCS _(suh) (MPa)	UCS _(sat) (MPa)	BTS _(suh) (MPa)	BTS _(sat) (MPa)
Vapnenac	1.19	1.17	66.50	37.20	5.40	3.10
Vapnenac	0.25	0.21	20.10	32.10	7.80	0.80
Vapnenac	1.13	1.13	92.70	80.80	7.90	5.10
Gips	0.50	0.14	13.50	8.50	1.30	1.40
Lapor	0.19	0.11	5.40	2.10	0.80	0.30

Ostale fizikalno mehaničke karakteristike iz studije utjecaja sadržaja vode na CERCHAR indeks abrazivnosti su prikazane u tablici 3-12.

Tablica 3-12 Ostala fizičko–mekanička svojstva ispitana od Abu Bakara i suradnika

Vrsta stijene	Gustoća _(suh) (gm/cm ³)	Gustoća _(sat) (gm/cm ³)	Poroznost (%)	EQC (%)
Siltit	1.87	1.56	57.90	36.30
Siltit	1.25	1.03	49.30	23.40
Siltit	2.84	2.67	127.60	79.40
Siltit	2.39	1.55	82.80	71.40
Pješčenjak	1.76	1.31	39.80	72.30
Pješčenjak	1.22	1.04	26.70	84.30
Pješčenjak	0.86	0.94	41.60	77.50
Pješčenjak	1.45	1.37	69.00	84.30
Pješčenjak	2.28	2.32	44.00	76.60
Pješčenjak	3.21	2.36	109.70	89.70
Pješčenjak	1.39	1.69	61.50	89.70

Tablica 3-12 Ostala fizičko–mehanička svojstva ispitana od Abu Bakara i suradnika

Vrsta stijene	Gustoća _(suh) (gm/cm ³)	Gustoća _(sat) (gm/cm ³)	Poroznost (%)	EQC (%)
Pješčenjak	1.15	1.24	27.10	64.60
Pješčenjak	2.61	2.16	29.00	84.50
Pješčenjak	1.44	1.26	16.70	76.90
Pješčenjak	1.50	1.80	21.20	82.40
Pješčenjak	1.25	1.19	11.00	69.30
Pješčenjak	1.81	1.32	46.40	85.30
Pješčenjak	1.31	1.04	17.10	83.90
Pješčenjak	2.91	2.15	56.80	68.10
Siderit	1.02	0.98	51.70	15.60
Dolomit	1.61	1.39	61.80	6.00
Dolomit	1.79	1.61	144.40	7.00
Dolomit	1.90	2.17	99.90	7.30
Dolomit	2.15	1.36	132.70	17.80
Vapnenac	1.06	0.86	65.30	2.60
Vapnenac	0.94	0.81	95.80	2.60
Vapnenac	1.46	0.99	80.70	3.40
Vapnenac	0.70	0.53	69.90	3.30
Vapnenac	1.19	1.17	66.50	2.00
Vapnenac	0.25	0.21	20.10	3.00
Vapnenac	1.13	1.13	92.70	2.20
Gips	0.50	0.14	13.50	0.50
Lapor	0.19	0.11	5.40	24.20

Capik i Yilmaz su 2016. objavili studiju: „Korelacija Cercharovog indeksa abrazivnosti, svojstva stijena i životnog vijeka bušaćih krana“. Uzorci stijena za ispitivanje uzeti su iz različitih geoloških struktura na sjevero-istoku Turske. Uzeta su 43 uzorka različitih vrsta stijena s 43 lokacije. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 3-13.

Tablica 3-13 Rezultati ispitivanja Capika i Yilmaza

Vrsta stijena	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	EQC (%)
Tuf	2.76	113.00	16.10	
Tuf	1.77	43.00	6.80	
Tuf	1.42	59.00	8.20	15.55
Tuf	2.59	120.00	17.40	20.75
Dolerit	2.29	85.00	9.30	26.10
Tuf	2.19	93.00	10.70	
Lapor	1.89	55.00	7.20	
Aglomerat	2.13	123.00	16.80	
Šljunak	1.86	42.00	5.00	8.95
Andezit	1.19	73.00	8.00	16.40
Pješčenjak	0.67	52.00	6.30	11.25
Gabro	1.29	37.00	6.90	11.15
Pješčenjak	1.63	72.00	15.40	
Pješčenjak	3.04	93.00	15.30	
Vapnenac	0.98	53.00	6.10	
Pješčenjak	1.86	101.00	12.20	25.00
Lapor/vapnenac	1.00	64.00	11.50	9.45
Dijabaz	1.15	74.00	13.50	18.60
Lapor	0.60	36.00	4.10	
Vapnenac	0.67	24.00	8.80	

Tablica 3-13 Rezultati ispitivanja Capika i Yilmaza – nastavak

Vrsta stijena	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	EQC (%)
Lapor/vapnenac	0.63	62.00	7.70	
Lapor	0.57	29.00	3.70	
Lapor	0.60	19.00	6.60	7.50
Lapor/vapnenac	0.56	15.00	3.80	
Lapor/vapnenac	0.54	18.00	3.00	
Bazalt	2.88	163.00	18.50	27.20
Bazalt	2.87	127.00	15.40	24.00
Lapor	0.81	57.00	8.90	14.10
Pješčenjak	0.54	30.00	5.40	11.25
Pješčenjak	2.43	96.00	11.70	
Pješčenjak	2.91	102.00	10.40	20.55
Vapnenac/lapor	0.65	69.00	5.70	2.50
Pješčenjak	3.15	181.00	20.00	53.00
Vapnenac	1.39	68.00	12.30	
Dijabaz	0.57	42.00	6.80	
Lapor	1.01	32.00	3.90	9.45
Vapnenac	0.58	36.00	4.30	
Siltit/lapor	0.43	42.00	7.40	
Pješčenjak	1.99	101.00	13.70	26.25
Lapor/vapnenac	0.54	25.00	4.60	
Dijabaz	2.37	138.00	14.00	31.70
Bazalt	2.84	131.00	16.30	20.51
Tuf	2.83	124.00	16.90	25.51

Ündül i Er. su 2017 objavili studiju: „Istraživanje učinka mikro-teksture i geo-mehaničkih svojstava na abrazivnost vulkanskih stijena. Uzorci su uzeti sa sjevero-zapada Turske, ukupno 23 uzorka je uzeto i ispitivano. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 3-14.

Tablica 3-14 Rezultati ispitivanja Ündüla i Era

Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	E (GPa)	EQC (%)	Brzina P-valova (m/s)
Andezit	2.58	124.00	6.50		13.2	4,180
Andezit	3.17	272.00	15.00	57.00	13.5	4,760
Andezit	2.49	154.00	9.80	30.80	12.1	3,770
Andezit	2.52	102.00	7.00	27.00	10.2	3,810
Andezit	3.39	238.00	16.70	53.40	14.5	4,690
Andezit	2.99	148.00	13.30	48.70	14.6	4,450
Andezit	3.56	289.00	18.10	56.20	14.0	4,890
Andezit	2.73	169.00	12.20	38.60	8.9	4,070
Andezit	2.61	124.00	10.00	40.30	9.9	3,800
Riodacit	3.01	233.00	15.60	42.80	22.8	4,590
Riodacit	3.19	242.00	16.90	44.80	23.1	4,720
Andezit	2.84	162.00	11.20	40.30	12.0	4,560
Andezit	3.09	153.00	10.00	38.30	11.8	4,290
Andezit	2.75	160.00	11.50	41.30	12.0	4,340
Andezit	3.74	247.00	15.86	49.00	14.0	4,800
Andezit	3.70	237.00	15.72	44.50	13.8	4,930
Andezit	3.43	153.00	14.86	43.80	9.9	4,830
Andezit	3.55	189.00	14.40	45.00	13.9	4,990

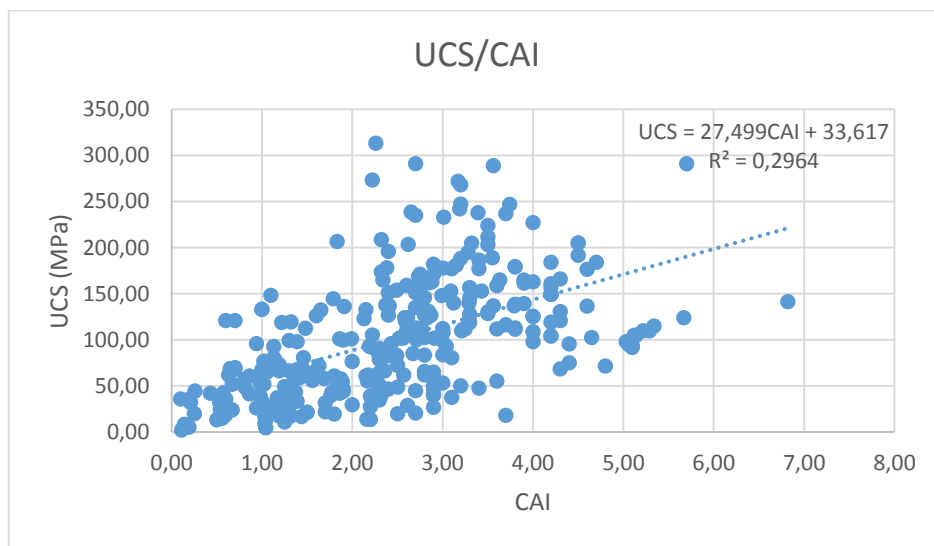
Tablica 3-14 Rezultati ispitivanja Ündüla i Era – nastavak

Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	E (GPa)	EQC (%)	Brzina P-valova (m/s)
Riodacit	3.28	195.00	15.70	41.60	23.3	4,350
Riodacit	3.32	205.00	14.80	41.70	19.7	4,580
Andezit	2.41	137.00	10.20	31.80	13.8	3,730
Andezit	2.70	151.00	10.00	42.60	16.1	4,150
Andezit	2.56	102.00	9.10	27.40	12.6	3,970

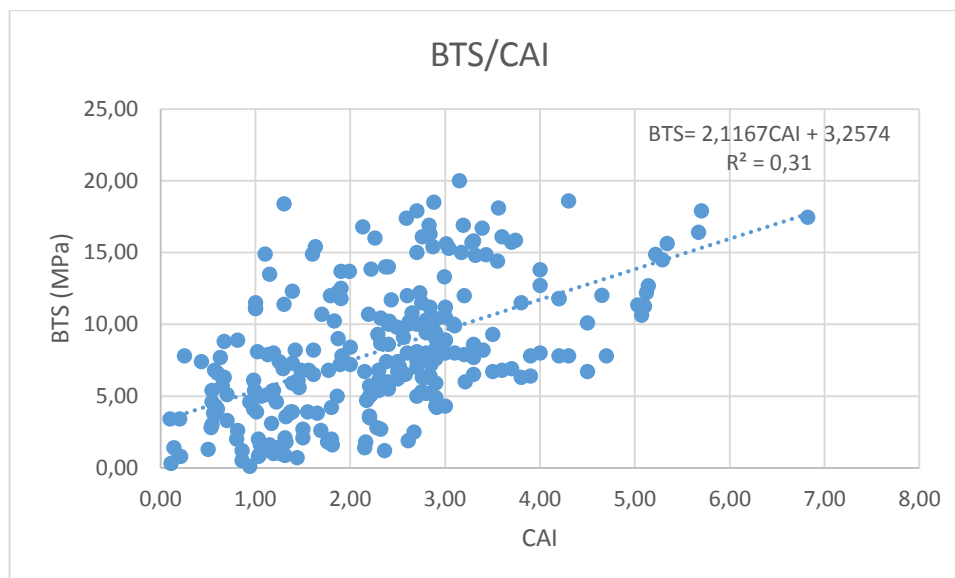
4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Analiza je provedena na 311 uzoraka. Stijene su podijeljene prema načinu postanka i prema toj podjeli napravljena je analiza rezultata ranije opisanih ispitivanja. Od 311 uzoraka bilo je 113 uzorka različitih sedimentnih stijena, 117 uzoraka magmatskih stijena i 81 uzorak metamorfnih stijena. Tablice s podacima ispitivanja uzoraka za analizu nalaze se u dodacima na kraju rada. Provedena je jednostavna regresijska analiza podataka ispitivanja i prikazani su rezultati sa najvećim koeficijentom determinacije.

Za početnih 311 uzoraka izračunata je aritmetička sredina CAI-a koja iznosi 2,49, UCS-a koja iznosi 101,99 MPa i BTS koji iznosi 8,12 MPa. Na slici 4.1 i 4.2 prikazani su modeli povezanosti UCS-a i BTS-a s CAI-om, svih stijena bez obzira na vrstu postanaka. Analizom je dobiveno da je za odnos UCS/CAI koeficijent determinacije 0.2964, dok je za odnos BTS/CAI koeficijent determinacije jednak 0.31.



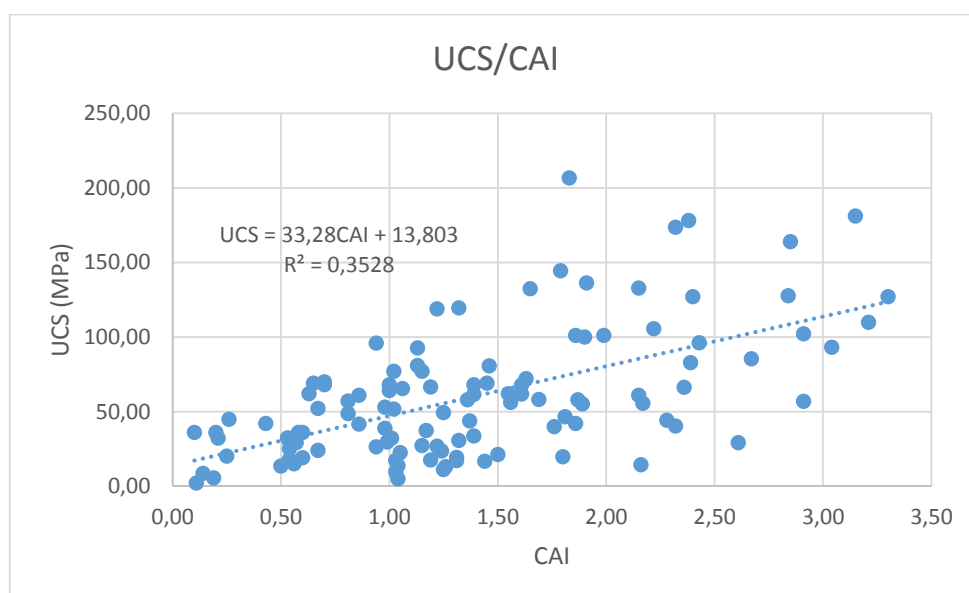
Slika 4.1 Zavisnost UCS-a o CAI



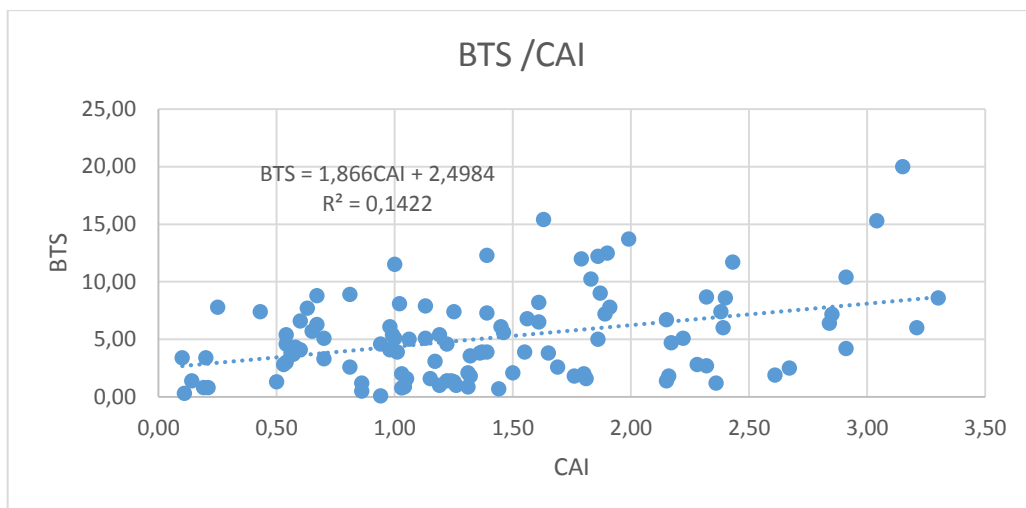
Slika 4.2 Zavisnost BTS-a o CAI

4.1. Analiza rezultata ispitivanja sedimentnih stijena

U analizi sedimentnih stijena srednja vrijednost za CAI je 1.39, za UCS 60.13 MPa i za BTS je 5.13 MPa. Na slikama 4.3 i 4.4 prikazani su modeli s linearnim koeficijentom determinacije. Općenito sedimente stijene su pokazale najbolju povezanost UCS-a i BTS-a sa CAI od svih vrsta stijena u ovoj analizi.



Slika 4.3 Zavisnost UCS-a o CAI sedimentnih stijena

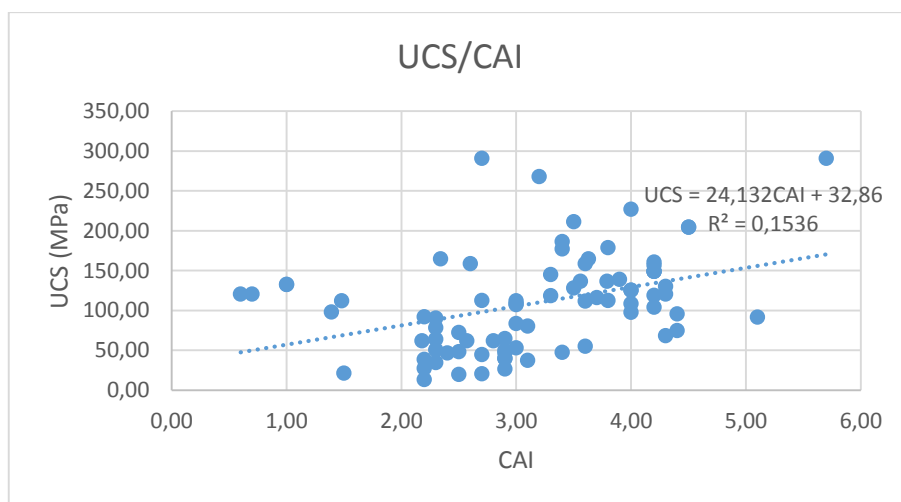


Slika 4.4 Zavisnost BTS-a o CAI sedimentnih stijena

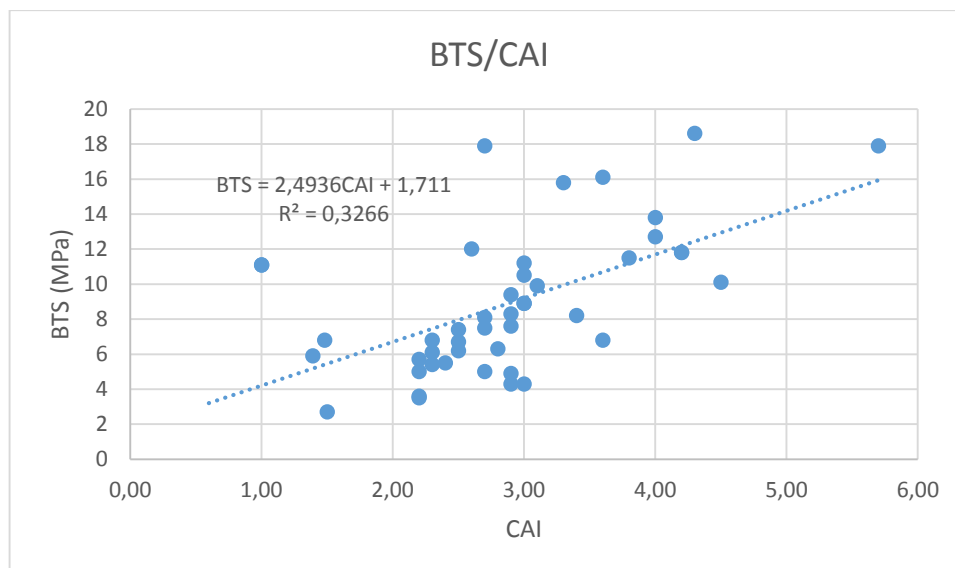
Korelacija između UCS i CAI nije značajna kao što se vidi na slici 4.3. Odnosno sam CAI nije dovoljan za procjenu UCS-a. Korelacija BTS/CAI nije značajna kao što se vidi iz slike 4.4, i nije dovoljan CAI za određivanje BTS-a.

4.2. Analiza metamorfnih stijena

U analizi metamorfnih stijena srednja vrijednost za CAI je 3.14, za UCS 108.72 MPa i za BTS je 8.88 MPa. Vidljivo je povećanje svih vrijednosti u odnosu na sedimentne stijene. Na slikama 4.5 i 4.6 prikazani su rezultati modela s najvećim koeficijentom determinacije.



Slika 4.5 Zavisnost UCS/CAI metamorfnih stijena



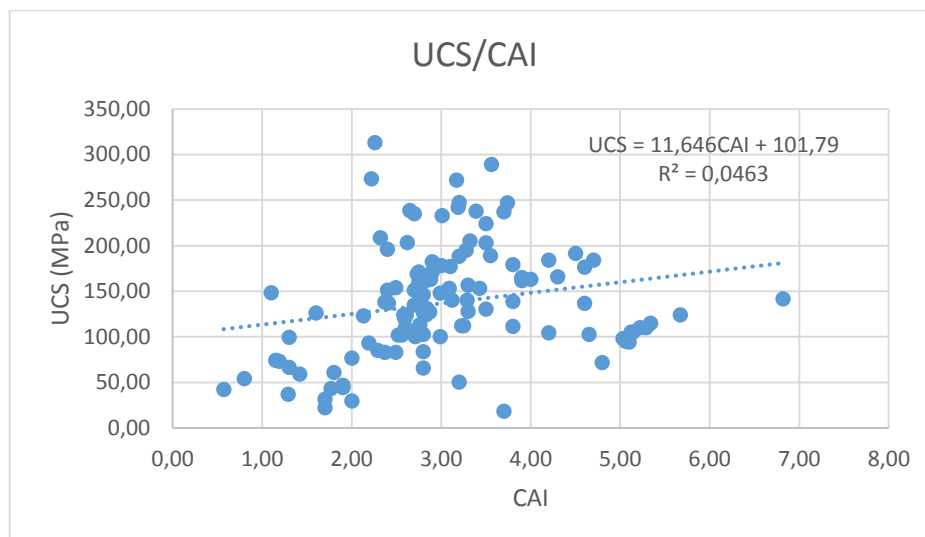
Slika 4.6 Zavisnost BTS/CAI metamornih stijena

Kao što je vidljivo na slici 4.5 nema opipljive zavisnosti između UCS-a metamornih stijena i CAI. Na slici 4.6 je prikazan odnos između BTS-a i CAI-a koji je znatno veći nego odnos UCS-a i CAI-a. Zavisnost BTS/CAI nije značajna kao što se vidi iz slike 4.6, ali je mnogo veća nego kod sedimentnih stijena.

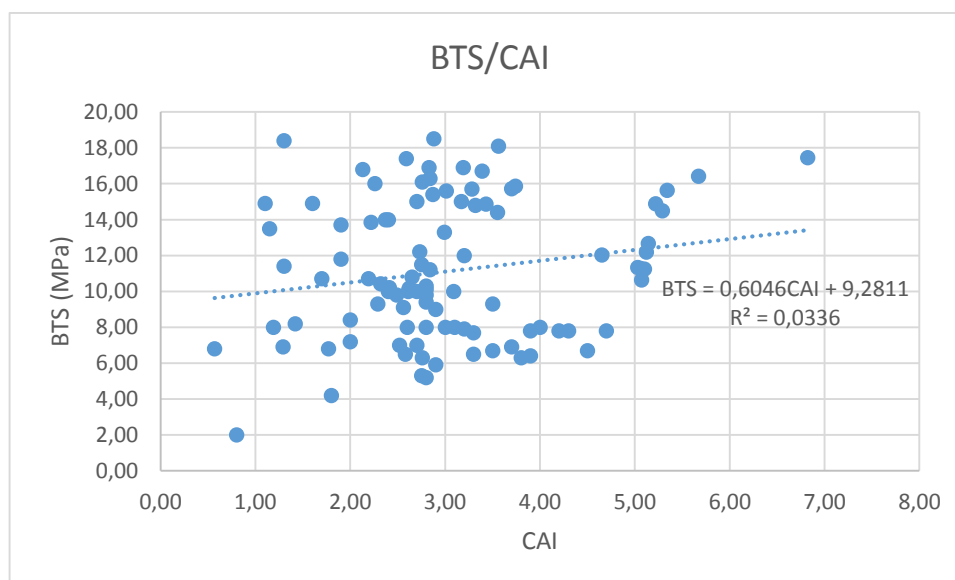
Treba ukazati da je UCS kod metamornih stijena dvostruko manji nego kod sedimentnih stijena, dok je BTS kod metamornih stijena dvostruko veći nego kod sedimentnih stijena. Također je zanimljivo da je korelacija za UCS sedimentnih stijena i BTS metamornih stijena s CAI-om jednaka.

4.3. Magmatske stijene

U analizi magmatskih stijena srednja vrijednost za CAI je 1.39, za UCS 60.13 MPa i za BTS je 5.13 MPa. Na slikama 4.7 i 4.8 prikazan je model s linearnim koeficijentom determinacije.



Slika 4.7 Zavisnost UCS/CAI magmatskih stijena



Slika 4.8 Zavisnost BTS/CAI magmatskih stijena

Kao što se vidi iz slike zavisnost UCS/CAI za magmatske stijene je mala, i najmanja je od ispitivanja. Broj podataka je bio veći nego u slučaju s metamorfnim stijenama, ali bez obzira na to nema značajne korelacije. Posebno je niska korelacija za BTS/CAI koja iznosi 0,0336, odnosno nema korelacije. To je najmanja korelacija BTS-a i fizičko–mehaničkih svojstava u odnosu na metamorfne i sedimentne stijene.

5. PROCJENA UCS-a I BTS-a DOBIVENIM MODELIMA

Modeli dobiveni u ranijem poglavlju će se koristiti za procjenu UCS-a i BTS-a. Ispitivanja su provedena od strane kolege Grgurića za završni rad 2017 godine. Ispitivano je pet uzorka s pet lokacija, dok je svaki pojedinačni uzorak ispitan pet puta. U tablici 5-1 prikazane su srednje vrijednosti ispitivanja provedenih od Grgurića CAI-a, UCS-a i BTS-a.

Tablica 5-1 Rezultati ispitivanja Grgurića

Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS(MPa)
Dijabaz	3.35	189.90	13.11
Dijabaz	2.53	178.06	12.83
Dijabaz	3.46	178.60	11.36
Vapnenac	1.42	122.20	10.62
Mramor	1.45	149.10	5.77

Analizom svih vrsta stijene, dobivena je korelacija vidljiva na slici 5.1 i 5.2. Korelacija podataka za UCS i BTS iznose:

$$UCS = 27,499CAI + 33,617 \quad (5-1)$$

Gdje je:

UCS – jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]

CAI – Cercharov indeks abrazivnosti

$$BTS = 2,1167CAI + 3,2574 \quad (5-2)$$

Gdje je:

BTS – indirektna vlačna čvrstoća [MPa]

CAI – Cercharov indeks abrazivnosti

U tablici 5-2 prikazane su vrijednosti prema spomenutim korelacijama.

Tablica 5-2 Izračun prema modelu analize

Vrsta stijene	CAI	UCS _{izračunati} (MPa)	BTS _{izračunati} (MPa)
Dijabaz	3.35	125,74	10.34
Dijabaz	2.53	103,19	8.61
Dijabaz	3.46	128,76	10.58
Vapnenac	1.42	72,67	6.26
Mramor	1.45	73,49	6.33

Kao što se vidi u tablici 5-2 rezultati dobiveni izračunom za UCS prema analizi podataka su velikog raspona odstupanja. Izračunati BTS prema analizi je pokazao mnogo manje odstupanje od UCS-a. Iako se analizom dobilo da je UCS pokazao veću korelaciju od BTS-a, u izračunu se pokazala veća korelacija s BTS.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirana je povezanost jednoosne tlačne čvrstoće i indirektne vlačne čvrstoće stijena sa abrazivnošću izraženom pomoću Cerchar indeksa abrazivnosti. U analizi su korišteni podaci iz raznih istraživanja, različitih tipova stijena iz cijeloga svijeta. Ispitivanja su provedena u različitim laboratorijima, te zbog toga postoje određena odstupanja u rezultatima. Analizom 311 uzoraka stijena utvrđena je zavisnost UCS-a i CAI-a sa koeficijentom determinacije $R^2=0,3986$ dok je zavisnost BTS-a i CAI-a iskazala koeficijent determinacije $R^2=0,31$. Dobivene zavisnosti nisu značajne i nedovoljne su za dobru procjenu navedenih svojstava.

Analizom sedimentnih stijena utvrđena je zavisnost UCS-a o CAI u iznosu od $R^2=0,3528$ dok je zavisnost BTS-a o CAI u iznosu $R^2=0,1422$. Koeficijenti determinacije su mali i nepouzadni za procjenu UCS-a i BTS-a.

Analizom metamorfnih stijena utvrđena je zavisnost UCS-a o CAI u iznosu od $R^2=0,1536$ dok je zavisnost BTS-a o CAI u iznosu $R^2=0,3266$. Koeficijenti determinacije su mali i nepouzadni za procjenu UCS-a i BTS-a.

Analizom magmatskih stijena utvrđena je zavisnost UCS-a o CAI u iznosu od $R^2=0,0463$ dok je zavisnost BTS-a o CAI u iznosu $R^2=0,0336$. Koeficijenti determinacije su izuzetno mali i nepouzadni za procjenu UCS-a i BTS-a.

Prema rezultatima ispitivanja kolege Grgurića napravljena je procjena UCS-a i BTS-a. Vidljiva su velika odstupanja za UCS, koja su čak i od 75 MPa. Dok je za BTS odstupanja manja, ali još uvijek velika. Odnosno odstupanje je do 4 MPa.

Daljnja istraživanja bi trebalo usmjeriti na ispitivanje višestruke zavisnosti jednoosne tlačne čvrstoće i indirektne vlačne čvrstoće o abrazivnosti i ostalim svojstvima kao što je na primjer gustoća, ekvivalentni sadržaj kvarca, poroznost, veličina mineralnih zrna itd.

7. LITERATURA

ABU BAKAR M.Z. , MAJEED Y., ROSTAMI J., 2016. Effects of rock water content on CERCHAR Abrasivity Indeks. ELSEVIER Wear 368-396: str 132-145.

ALBER, M., YARALI, O., DAHL, F., BRULAND, A., KÄSLING, H., MICHALAKOPOULOS, T., CARDU, M., HAGAN, P., 2013. ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47: str. 261-266.

ATKINSON T, CASSAPI V.B., SINGH , 1986. Assessment of abrasive wear resistance potential in rock excavation machinery. Int. J. of Min. and Geol. Eng; 3: 151-163.

BRIŠEVAC Z., KUJUNDŽIĆ T., ČAJI S., 2015. Sadašnje spoznaje o ispitivanju vlačne čvrstoće stijena uporabom brazilskoga testa , The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, pp. 115-128

CAPIK M., YILMAZ A.O., 2016. Correlation between Cerchar abrasivity index, rock properties, and drill bit lifetime. Arab J Geosci 10: str 15-26.

ER S., I TUGRUL A., 2016. Correlation of physico-mechanical properties of granitic rocks with Cerchar Abrasivity Index in Turkey, ELSEVIER Measurement 91: str 114-123.

GRGURIĆ D., 2017. Ispitivanje abrazivnosti stijena cerchar metodom. Završni rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

HE J., LI S., LI X., WANG X., GUO J., 2016. Study on the Correlations Between Abrasiveness and Mechanical Properties of Rocks Combining with the Microstructure Characteristic.

HRŽENJAK, P., 2013. Interna skripta Mehanika stijena 1 Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

HRŽENJAK P., BRIŠEVAC Z., 2009. Upute i predlošci za laboratorijske Vježbe i programe iz mehanike stijena. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

ISRM, 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods. Editor E.T. Brown. Pergamon press.

KAHRAMAN S., ALBER M., FENER M., GUNAYDIN O., 2010. The usability of Cerchar abrasivity index for the prediction of UCS and E of Misis Fault Breccia: Regression and artificial neural networks analysis. *Expert Systems with Applications* 37: str 8750-8756.

KAHRAMAN S., ALBER M., GUNAYDIN O., FENER M., 2014. The usability of the Cerchar abrasivity index for the evaluation of the triaxial strength of Misis Fault Breccia, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74: str. 163–170.

KO T. Y., KIM T. K., SON Y., JEON S., 2016. Effect of geomechanical properties on Cerchar Abrasivity Index (CAI) and its application to TBM tunnelling.

KÜPFERLE J., RÖTTGER A., THEISEN W., ALBER M., 2015. Abrasivity of Rock and Soil. ResearchGate

LABAŠ, M., KREPELKA, F., IVANIČOVÁ, L., 2012. Assessment of abrasiveness for research of rock cutting. *Acta Montanistica Slovaca*, 17(1), str. 65-73.

MAŁKOWSKI P., OSTROWSKI Ł., 2017. The Methodology for the Young Modulus Derivation for Rocks and Its Value, Symposium of the International Society for Rock Mechanics. ELSEVIER, 191: str. 134-141.

MARIČIĆ A., 2014. Utjecaj svojstava benkovačkoga prirodnoga kamena na njegovu postojanost. Doktorski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

MORADIZADEH M., CHESHOMI A., GHAFOORI M., 2016. TrighAzali S., Correlation of equivalent quartz content, Slake durability index and Is_{50} with Cerchar abrasiveness index

for different types of rock. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 86: str. 42–47.

ROSTAMI J., GHASEMI A., GHARAHBAGH E.A., DOGRUOZ C., DAHL F., 2013. Study of Dominant Factors Affecting Cerchar Abrasivity Index. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47: str. 261-266.

ÜNDÜLA O., E R S., 2017. Investigating the effects of micro-texture and geo-mechanical properties on the abrasiveness of volcanic rocks, Engineering Geology 229: str. 85-94

DODACI

Tablica D-1.Rezultati ispitivanja laboratorija Cercharovim postupkom za sedam uzoraka stijena

Laboratory	Lab1	Lab2	Lab3	Lab4	SINTEF	Lab5	PSU										
Tvrdoća igle(HRC)	54–56		54–56	41–43	54–56	54–56	41–43	41–43		54–56	41–43	54–56	41–43	54–56			
Vrsta stijene	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe	Otpiljeno Sviježe
1 Vapnenac	0.5	0.4	0.6	0.5	0.30.8	0.4	0.9	0.3	0.3	1.6	1.4	0.4	0.3	0.20.3	0.1	0.2	
2 Škriljavac	1.1	1.1	1.8	1.6	1.91.4	1.8	2.3	1.4	1.6	2.6	2.4	1.2	0.9	1.3	1.3	0.7	0.6
3 Kalcit	0.8	0.9	2.6	3.0	2.31.1	0.7	1.2	2.1	1.7	3.1	2.3	1.1	0.7	1.71.5	1.0	0.7	
4 Mramor	1.0	1.0	3.1	2.8	2.61.6	1.7	2.2	2.3	2.3	3.1	3.0	1.3	1.6	2.12.1	1.0	1.0	
5 Pješčenjak	3.7	4.2	4.3	4.1	4.52.7	3.2	3.6	3.8	3.8	5.7	5.1	3.8	4.1	4.03.7	2.4	3.3	
6 Granit	4.2	4.4	4.9	4.8	4.34.6	4.6	5.0	4.4	5.5	5.7	6.3	4.7	4.5	4.65.6	4.7	4.2	
7 Kvarcit	3.6	5.8	4.7	5.5	4	2.6	4.3	4.7	3	6.4	3.4	8.4	3.0	7.2	3.37.1	2.7	5.7

Tablica D-2. Fizikalno–mehanička svojstva sedimentnih stijena

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
1	Breča	0,26	44,70		4.820,00	20.000,00	2,50		
2	Dolomit	1,61	61,80	6,50			2,58	6,15	6,00
3	Dolomit	1,79	144,40	12,00			2,77	1,23	7,00
4	Dolomit	1,90	99,90	12,50			2,81	0,38	7,30
5	Dolomit	2,15	132,70	6,70			2,49	6,43	17,80

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
6	Dolomit	1,39	33,50	3,90			2,64	6,15	6,00
7	Dolomit	1,61	67,70	8,20			2,78	1,23	7,00
8	Dolomit	2,17	55,50	4,70			2,82	0,38	7,30
9	Dolomit	1,36	57,90	3,80			2,56	6,43	17,80
10	Feldspatski pješčenjak	2,22	105,40	5,10		11.500,00			54,63
11	Gips	0,50	13,50	1,30			2,07	18,37	0,50
12	Gips	0,14	8,50	1,40			2,25	18,37	0,50
13	Kalcit	1,00	68,00	5,10	4.249,00	41.000,00	2,71	0,20	4,00
14	Kalcit	0,70	68,00	5,10	4.249,00	41.000,00	2,71	0,20	4,00
15	Kvarcni pješčenjak	2,32	173,55	8,68		18.300,00			91,86
16	Lapor	0,19	5,40	0,80			2,00	24,70	24,20
17	Lapor	0,11	2,10	0,30			2,25	24,70	24,20
18	Lapor	1,89	55,00	7,20					
19	Lapor	0,60	36,00	4,10					
20	Lapor	0,57	29,00	3,70					
21	Lapor	0,60	19,00	6,60					7,50

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
22	Lapor	0,81	57,00	8,90					14,10
23	Lapor	1,01	32,00	3,90					9,45
24	Lapor/vapnenac	1,00	64,00	11,50					9,45
25	Lapor/vapnenac	0,63	62,00	7,70					
26	Lapor/vapnenac	0,56	15,00	3,80					
27	Lapor/vapnenac	0,54	18,00	3,00					
28	Lapor/vapnenac	0,54	25,00	4,60					
29	Muljnjak	1,03	9,50	0,79		10.000,00			15,94
30	Muljnjak	1,05	22,50	1,60		11.200,00			12,75
31	Pješčenjak	2,40	127,00	8,60	3.528,00	21.000,00	2,62	2,50	54,00
32	Pješčenjak	3,30	127,00	8,60	3.528,00	21.000,00	2,62	2,50	54,00
33	Pješčenjak	1,83	206,70	10,23		19.300,00			28,62
34	Pješčenjak	1,76	39,80	1,80			2,63	6,87	72,30
35	Pješčenjak	1,22	26,70	1,40			2,25	12,22	84,30
36	Pješčenjak	0,86	41,60	0,50			2,19	11,74	77,50
37	Pješčenjak	1,45	69,00	6,10			2,50	6,82	84,30
38	Pješčenjak	2,28	44,00	2,80			2,53	3,12	76,60
39	Pješčenjak	3,21	109,70	6,00			2,57	4,73	89,70

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
40	Pješčenjak	1,39	61,50	7,30			2,57	4,79	89,70
41	Pješčenjak	1,15	27,10	1,60			2,29	10,83	64,60
42	Pješčenjak	2,61	29,00	1,90			2,11	15,05	84,50
43	Pješčenjak	1,44	16,70	0,70			2,16	10,26	76,90
44	Pješčenjak	1,50	21,20	2,10			2,18	12,10	82,40
45	Pješčenjak	1,25	11,00	1,30			2,28	10,70	69,30
46	Pješčenjak	1,81	46,40	1,60			2,22	11,40	85,30
47	Pješčenjak	1,31	17,10	0,86			2,48	12,77	83,90
48	Pješčenjak	2,91	56,80	4,20			2,60	3,61	68,10
49	Pješčenjak	1,31	19,10	2,10			2,70	6,87	72,30
50	Pješčenjak	1,04	13,60	0,90			2,37	12,22	84,30
51	Pješčenjak	0,94	26,20	0,10			2,31	11,74	77,50
52	Pješčenjak	1,37	43,70	3,90			2,57	6,82	84,30
53	Pješčenjak	2,32	40,30	2,70			2,57	3,12	76,60
54	Pješčenjak	2,36	66,30	1,20			2,62	4,73	89,70
55	Pješčenjak	1,69	58,00	2,60			2,62	4,79	89,70
56	Pješčenjak	1,24	23,60	1,40			2,40	10,83	64,60
57	Pješčenjak	2,16	14,20	1,80			2,26	15,05	84,50

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
58	Pješčenjak	1,26	13,00	1,00			2,26	10,26	76,90
59	Pješčenjak	1,80	19,70	2,00			2,31	12,10	82,40
60	Pješčenjak	1,19	17,50	1,00			2,38	10,70	69,30
61	Pješčenjak	1,32	30,60	1,80			2,33	11,40	85,30
62	Pješčenjak	1,04	4,80	0,88			2,61	12,77	83,90
63	Pješčenjak	2,15	60,90	1,40			2,64	3,61	68,10
64	Pješčenjak	0,67	52,00	6,30					11,25
65	Pješčenjak	1,63	72,00	15,40					
66	Pješčenjak	3,04	93,00	15,30					
67	Pješčenjak	1,86	101,00	12,20					25,00
68	Pješčenjak	0,54	30,00	5,40					11,25
69	Pješčenjak	2,43	96,00	11,70					
70	Pješčenjak	2,91	102,00	10,40					20,55
71	Pješčenjak	3,15	181,00	20,00					53,00
72	Pješčenjak	1,99	101,00	13,70					26,25
73	Siderit	1,02	51,70	8,10			2,62	20,02	15,60
74	Siderit	0,98	38,80	4,10			2,82	20,02	15,60
75	Siltit	1,87	57,90	9,00			2,60	3,63	36,30

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
76	Siltit	1,25	49,30	7,40			2,69	1,03	23,40
77	Siltit	2,84	127,60	6,40			2,62	1,17	79,40
78	Siltit	2,39	82,80	6,00			2,63	2,82	71,40
79	Siltit	1,56	56,10	6,80			2,64	3,63	36,30
80	Siltit	1,03	17,30	2,00			2,71	1,03	23,40
81	Siltit	2,67	85,30	2,50			2,64	1,17	79,40
82	Siltit	1,55	62,00	3,90			2,65	2,82	71,40
83	Siltit/lapor	0,43	42,00	7,40					
84	Sitnoznati pješčenjak	1,22	118,80	4,60		17.200,00			50,44
85	Sitnoznati pješčenjak	1,91	136,20	7,80		17.560,00			22,31
86	Sitnoznati pješčenjak	2,85	163,83	7,19		23.800,00			73,31
87	Sitnoznati pješčenjak	2,38	178,12	7,41		19.200,00			78,35
88	Sitnoznati pješčenjak	1,32	119,46	3,56		16.350,00			17,93

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
89	Sitnozrnati pješčenjak	1,65	132,24	3,80		10.640,00			14,68
90	Šljunak	1,86	42,00	5,00					8,95
91	Vapnenac	0,10	36,00	3,40	4.174,00	17.000,00	2,04	18,80	4,00
92	Vapnenac	0,20	36,00	3,40	4.174,00	17.000,00	2,04	18,80	4,00
93	Vapnenac	1,15	77,00						2,00
94	Vapnenac	1,02	77,00						2,00
95	Vapnenac	1,06	65,30	5,00			2,61	3,47	2,60
96	Vapnenac	0,94	95,80	4,60			2,67	0,79	2,60
97	Vapnenac	1,46	80,70	5,60			3,17	2,81	3,40
98	Vapnenac	0,70	69,90	3,30			2,65	1,37	3,30
99	Vapnenac	1,19	66,50	5,40			2,69	1,17	2,00
100	Vapnenac	0,25	20,10	7,80			2,50	6,53	3,00
101	Vapnenac	1,13	92,70	7,90			2,47	7,15	2,20
102	Vapnenac	0,86	60,90	1,20			2,64	3,47	2,60
103	Vapnenac	0,81	48,70	2,60			2,68	0,79	2,60
104	Vapnenac	0,99	29,60	5,40			3,20	2,81	3,40
105	Vapnenac	0,53	32,20	2,80			2,66	1,37	3,30

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
106	Vapnenac	1,17	37,20	3,10			2,70	1,17	2,00
107	Vapnenac	0,21	32,10	0,80			2,57	6,53	3,00
108	Vapnenac	1,13	80,80	5,10			2,54	7,15	2,20
109	Vapnenac	0,98	53,00	6,10					
110	Vapnenac	0,67	24,00	8,80					
111	Vapnenac	1,39	68,00	12,30					
112	Vapnenac	0,58	36,00	4,30					
113	Vapnenac/lapor	0,65	69,00	5,70					2,50

Tablica D-4. Fizikalno–mehanička svojstva metamorfnih stijena

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm ³)	Poroznost (%)	EQC (%)
1	Amfibolit	3,50	128,50						38,00
2	Amfibolit	3,50	211,60						6,00
3	Amfibolit	4,00	227,30						7,00
4	Amfibolit	3,90	139,20						13,00
5	Amfibolit	3,20	268,10						6,00
6	Amfibolit/ škriljavci	3,56	137,00						40,00
7	Amfibolit/ škriljavci	3,79	137,00						40,00
8	Gnajs	2,57	62,00						71,00
9	Gnajs	2,18	62,00						71,00
10	Gnajs	4,00	125,60	12,70					35,00
11	Gnajs	4,20	149,50	11,80					27,00
12	Gnajs	4,20	149,50	11,80					27,00
13	Gnajs	4,50	204,90	10,10					20,00
14	Gnajs	3,30	145,30						5,00
15	Gnajs	5,10	91,80						31,00

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm ³)	Poroznost (%)	EQC (%)
16	Gnajs	3,70	116,50						40,00
17	Gnajs	4,30	130,50						42,00
18	Gnajs	4,20	160,80						36,00
19	Gnajs	3,60	158,80						27,00
20	Gnajs	3,40	177,30						30,00
21	Gnajs	4,20	157,00						35,00
22	Gnajs	4,20	119,20						27,00
23	Gnajs	4,30	120,80						33,00
24	Gnajs	4,00	98,00						34,00
25	Gnajs	4,40	95,70						9,00
26	Gnajs	3,40	186,70						23,00
27	Gnajs	3,80	179,10						43,00
28	Gnajs	4,00	125,60						35,00
29	Gnajs	4,20	149,50						27,00
30	Gnajs	4,50	204,90						20,00
31	Kvarcit	2,70	291,00	17,90	6.856,00	70.000,00	2,63	0,50	100,00
32	Kvarcit	5,70	291,00	17,90	6.856,00	70.000,00	2,63	0,50	100,00

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
33	Kvarcit	2,34	165,00						100,00
34	Kvarcit	3,63	165,00						100,00
35	Kvarcit	4,20	104,40						78,00
36	Mramor	1,00	133,00	11,10	4.989,00	67.000,00	2,68	0,30	4,00
37	Mramor	1,00	133,00	11,10	4.989,00	67.000,00	2,68	0,30	4,00
38	Mramor	1,39	98,20	5,90		25.100,00			3,61
39	Mramor	1,48	112,50	6,80		24.300,00			1,97
40	Propilit	2,60	159,00	12,00					17,90
41	Škriljevac	0,70	121,00		7.504,00	75.000,00	2,75	0,90	2,00
42	Škriljevac	0,60	121,00		7.504,00	75.000,00	2,75	0,90	2,00
43	Škriljevac	4,30	68,60	18,60					50,00
44	Škriljevac	2,30	34,70	6,10					19,00
45	Škriljevac	3,60	55,20	16,10					37,00
46	Škriljevac	1,50	21,60	2,70					29,00
47	Škriljevac	2,20	27,70	5,00					57,00
48	Škriljevac	2,90	50,00	7,60					26,00
49	Škriljevac	2,90	39,90	8,30					35,00

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm ³)	Poroznost (%)	EQC (%)
50	Škriljevac	2,50	19,80	6,70					39,00
51	Škriljevac	3,40	47,70	8,20					14,00
52	Škriljevac	3,60	112,00	6,80					25,00
53	Škriljevac	3,00	107,50	8,90					16,00
54	Škriljevac	2,20	13,60	3,50					35,00
55	Škriljevac	4,00	108,90	13,80					30,00
56	Škriljevac	2,50	48,70	7,40					30,00
57	Škriljevac	3,30	118,80	15,80					50,00
58	Škriljevac	2,70	20,60	8,10					55,00
59	Škriljevac	2,90	27,00	4,90					23,00
60	Škriljevac	3,10	80,70	9,90					14,00
61	Škriljevac	3,00	112,40	10,50					12,00
62	Škriljevac	2,40	46,80	5,50					17,00
63	Škriljevac	3,00	108,60	11,20					21,00
64	Škriljevac	2,90	65,00	9,40					26,00
65	Škriljevac	2,90	46,70	4,30					16,00
66	Škriljevac	2,50	72,50	6,20					16,00

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm ³)	Poroznost (%)	EQC (%)
67	Škriljevac	2,70	112,80	7,50					12,00
68	Škriljevac	3,00	53,30	4,30					18,00
69	Škriljevac	3,00	83,70	8,90					19,00
70	Škriljevac	3,80	112,80	11,50					17,00
71	Škriljevac	2,80	62,10	6,30					38,00
72	Škriljevac	2,70	44,80	5,00					60,00
73	Škriljevac	2,30	78,60	5,40					22,00
74	Škriljevac	2,30	90,60	6,80					12,00
75	Škriljevac	2,20	39,00	5,70					56,00
76	Škriljevac	2,20	92,40	3,60					30,00
77	Škriljevac	4,40	75,00						60,00
78	Škriljevac	2,30	51,00						51,00
79	Škriljevac	3,10	37,60						14,00
80	Škriljevac	2,90	39,90						35,00
81	Škriljevac	2,30	64,30						14,00

Tablica D-6. Fizikalno–mehanička svojstva magmatskih stijena

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm ³)	Poroznost (%)	EQC (%)
1	Aglomerat	2,13	123,00	16,80					
2	Andezit	2,58	124,00	6,50	4.180,00				13,20
3	Andezit	3,17	272,00	15,00	4.760,00	57.000,00			13,50
4	Andezit	2,49	154,00	9,80	3.770,00	30.800,00			12,10
5	Andezit	2,52	102,00	7,00	3.810,00	27.000,00			10,20
6	Andezit	3,39	238,00	16,70	4.690,00	53.400,00			14,50
7	Andezit	2,99	148,00	13,30	4.450,00	48.700,00			14,60
8	Andezit	3,56	289,00	18,10	4.890,00	56.200,00			14,00
9	Andezit	2,73	169,00	12,20	4.070,00	38.600,00			8,90
10	Andezit	2,61	124,00	10,00	3.800,00	40.300,00			9,90
11	Andezit	2,84	162,00	11,20	4.560,00	40.300,00			12,00
12	Andezit	3,09	153,00	10,00	4.290,00	38.300,00			11,80
13	Andezit	2,75	160,00	11,50	4.340,00	41.300,00			12,00
14	Andezit	3,74	247,00	15,86	4.800,00	49.000,00			14,00
15	Andezit	3,70	237,00	15,72	4.930,00	44.500,00			13,80

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
16	Andezit	3,43	153,00	14,86	4.830,00	43.800,00			9,90
17	Andezit	3,55	189,00	14,40	4.990,00	45.000,00			13,90
18	Andezit	2,41	137,00	10,20	3.730,00	31.800,00			13,80
19	Andezit	2,70	151,00	10,00	4.150,00	42.600,00			16,10
20	Andezit	2,56	102,00	9,10	3.970,00	27.400,00			12,60
21	Andezit	1,19	73,00	8,00					16,40
22	Aplit/ sitnozrnati granit	3,12	140,00						84,00
23	Aplit/ sitnozrnati granit	3,29	140,00						84,00
24	Bazalt	2,37	83,00						32,00
25	Bazalt	2,49	83,00						32,00
26	Bazalt	2,88	163,00	18,50					27,20
27	Bazalt	2,87	127,00	15,40					24,00
28	Bazalt	2,84	131,00	16,30					20,51
29	Dijabaz	1,15	74,00	13,50					18,60
30	Dijabaz	0,57	42,00	6,80					
31	Dijabaz	2,37	138,00	14,00					31,70
32	Diorit	2,75	171,20	5,30		46.400,00			49,16

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm ³)	Poroznost (%)	EQC (%)
33	Diorit	2,70	235,00	15,00					7,50
34	Dolerit	2,29	85,00	9,30					26,10
35	Gabro	2,60	110,00	8,00					2,40
36	Gabro	1,29	37,00	6,90					11,15
37	Granit	4,70	184,00	7,80	5.129,00	49.000,00	2,64	0,60	58,00
38	Granit	4,20	184,00	7,80	5.129,00	49.000,00	2,64	0,60	58,00
39	Granit	3,30	128,00	6,50					26,00
40	Granit	4,30	165,90	7,80					14,00
41	Granit	3,90	164,70	6,40					23,00
42	Granit	3,70	18,20	6,90					35,00
43	Granit	4,50	191,60	6,70					17,00
44	Granit	2,80	65,70	5,20					17,00
45	Granit	3,20	188,20	7,90					35,00
46	Granit	3,50	203,20	6,70					15,00
47	Granit	3,30	156,80	7,70					18,00
48	Granit	3,20	247,30	12,00					16,00
49	Granit	2,80	164,60	9,80					17,00

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
50	Granit	2,80	126,90	9,40					20,00
51	Granit	3,90	161,60	7,80					18,00
52	Granit	3,80	111,40	6,30					25,00
53	Granit	4,00	163,10	8,00					22,00
54	Granit	3,00	178,00	8,00					25,80
55	Granit	2,90	171,00	9,00					37,60
56	Granit	2,80	146,00	8,00					30,80
57	Granit	2,70	135,00	7,00					26,20
58	Granit	3,10	177,00	8,00					31,00
59	Granit	2,40	151,00	10,00					29,50
60	Granit	2,00	76,60	7,20					40,00
61	Granit	2,00	29,60	8,40					30,00
62	Granit	1,90	46,50	13,70					20,00
63	Granit	1,90	44,10	11,80					35,00
64	Granit	1,60	126,10	14,90					44,00
65	Granit	1,30	99,40	11,40					47,00
66	Granit	0,80	54,20	2,00					45,00

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
67	Granit	1,70	31,60	10,70					39,00
68	Granit	1,30	66,30	18,40					31,00
69	Granit	1,10	148,40	14,90					10,00
70	Granit	1,80	60,80	4,20					61,00
71	Granit	3,80	179,10						43,00
72	Granit	3,90	164,70						23,00
73	Granit	4,60	136,70						14,00
74	Granit	4,80	71,70						18,00
75	Granit	4,60	176,40						24,00
76	Granit	1,70	21,90						5,00
77	Granit	5,22	110,00	14,88	4.712,00				25,10
78	Granit	5,06	95,00	11,28	4.323,00				21,10
79	Granit	5,03	98,00	11,34	4.309,00				19,30
80	Granit	5,67	124,00	16,41	5.355,00				28,40
81	Granit	5,34	115,00	15,64	5.177,00				25,20
82	Granit	5,29	110,00	14,50	4.790,00				18,90
83	Granit	5,12	105,00	12,19	4.476,00				6,80

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
84	Granit	5,10	94,00	11,25	4.177,00				21,70
85	Granit	4,65	102,50	12,02	4.204,00				5,60
86	Granit	5,14	105,00	12,68	4.401,00				29,10
87	Granit	6,82	141,50	17,45	5.322,00				34,80
88	Granit	5,07	95,00	10,64	4.051,00				5,20
89	Granit/pegmatit	2,71	100,00						56,00
90	Granit/pegmatit	2,99	100,00						56,00
91	Granophyre	2,40	196,00	14,00					19,40
92	Monzonit - granit	2,62	203,55	10,18		20.300,00			59,66
93	Monzonit - granit	2,65	238,56	10,80		23.500,00			58,28
94	Monzonit - granit	2,32	208,64	10,43		21.200,00			59,65
95	Pegmatit	2,80	83,40	10,10					7,00
96	Pegmatit	2,90	182,20	5,90					33,00
97	Pegmatit	2,80	102,70	10,30					22,00
98	Pegmatit	3,50	130,40	9,30					18,00
99	Pegmatit	4,20	104,40						78,00
100	Pegmatit	3,20	50,12						29,00

Redni broj	Vrsta stijene	CAI	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brzina P-valova (m/s)	E (MPa)	Gustoća (gm/cm3)	Poroznost (%)	EQC (%)
101	Pegmatit	3,50	224,00						24,00
102	Pegmatit	3,80	138,80						30,00
103	Riodacit	3,01	233,00	15,60	4.590,00	42.800,00			22,80
104	Riodacit	3,28	195,00	15,70	4.350,00	41.600,00			23,30
105	Riodacit	3,32	205,00	14,80	4.580,00	41.700,00			19,70
106	Riodacit	3,19	242,00	16,90	4.720,00	44.800,00			23,10
107	Sijenit - granit	2,76	138,10	6,30		22.100,00			51,49
108	Tonalit	3,23	112,00						48,00
109	Tonalit	3,25	112,00						48,00
110	Tuf	2,26	313,20	16,00		29.100,00			84,34
111	Tuf	2,22	273,30	13,84		26.400,00			78,88
112	Tuf	2,76	113,00	16,10					
113	Tuf	1,77	43,00	6,80					
114	Tuf	1,42	59,00	8,20					15,55
115	Tuf	2,59	120,00	17,40					20,75
116	Tuf	2,19	93,00	10,70					
117	Tuf	2,83	124,00	16,90					25,51